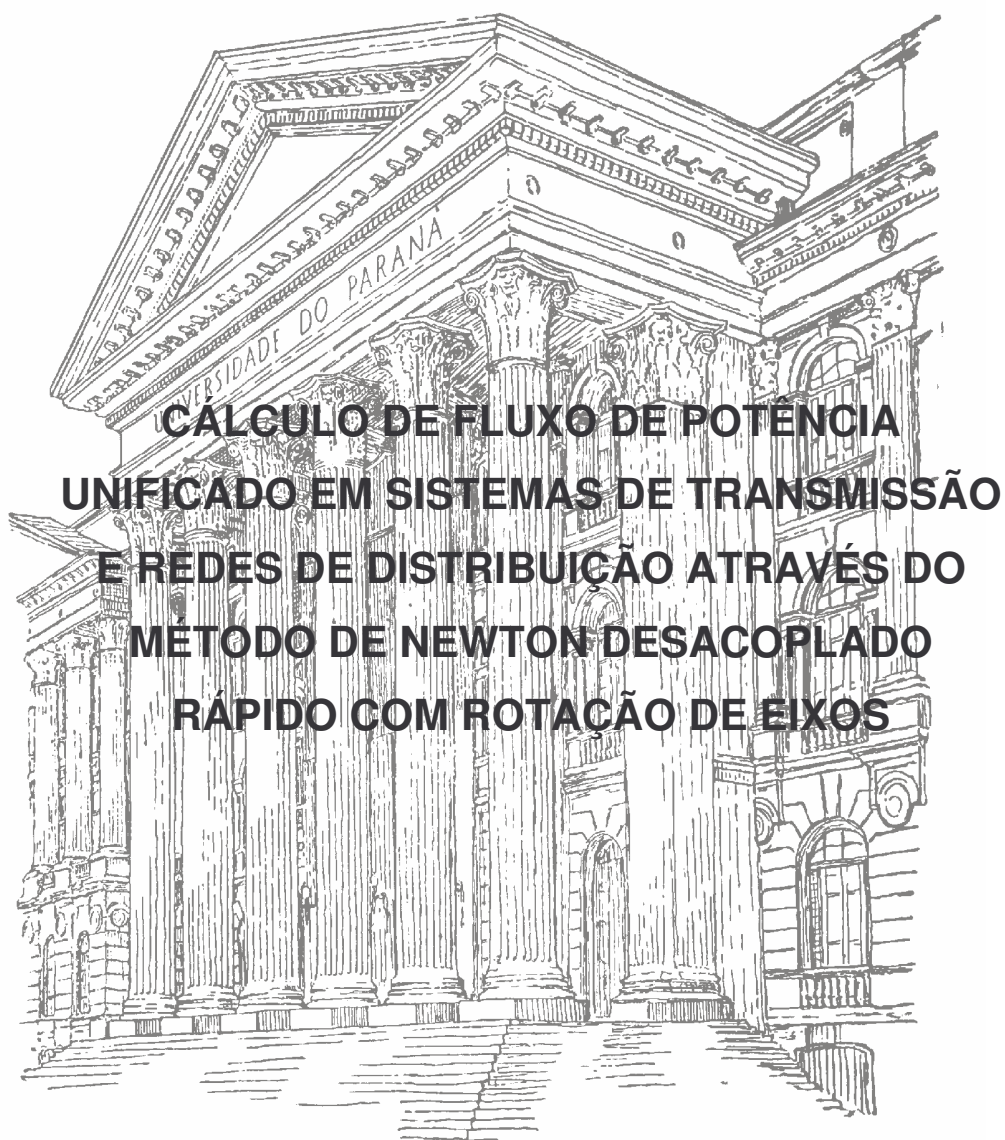


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TARCISIO LODDI



**CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA
UNIFICADO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
E REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DO
MÉTODO DE NEWTON DESACOPLADO
RÁPIDO COM ROTAÇÃO DE EIXOS**

**CURITIBA
2010**

TARCISIO LODDI

**CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADO EM
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E REDES DE DISTRIBUIÇÃO
ATRAVÉS DO MÉTODO DE NEWTON DESACOPLADO
RÁPIDO COM ROTAÇÃO DE EIXOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial á obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, que esteve comigo em todos os momentos. Nos alegres e principalmente nos mais difíceis. Também agradeço a Ele ter me colocado em uma família onde o estudo sempre foi fundamental e incentivado.

Agradeço sempre a minha família. Muito especialmente aos meus pais, Augusto e Irene, pelo incentivo e esforço ao longo dos anos para que eu estudasse e sempre mostrando a importância e necessidade de se ter uma vida digna e honesta.

Aos meus irmãos Luis Augusto, Maria Therezinha e Maria Marta que sempre me apoiaram e incentivaram em tudo que fiz.

Agradeço a minha orientadora Professora Elizete Maria Lourenço, pela confiança, incentivo, idéias, disposição e sempre me transmitindo calma e tranquilidade nos momentos que mais necessitava.

Agradeço também aos colegas do Mestrado que de alguma forma ou outra contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná.

Dedico esse trabalho a minha filha
Mariana Vicelli Loddi e minha esposa
Alliete M. Vicelli Loddi

RESUMO

Os estudos para o planejamento de curto, médio e longo prazo dos sistemas elétricos bem como para a operação dos mesmos são baseados em simulações do fluxo de potência das redes utilizando-se ferramentas computacionais e métodos de resoluções bem fundamentados. Estes métodos são diferentes ao ser comparado com o uso em sistemas de transmissão com os utilizados em sistemas de distribuição. A dissertação propõe uma estratégia de cálculo de fluxo de potência em um sistema composto de rede de transmissão, com características de ligações em anel, conectada com a rede de distribuição, com características radiais. Esta conexão elétrica é feita através de transformadores. Este método é baseado no método de Newton Desacoplado Rápido com a aplicação da rotação de eixos no sistema de distribuição. O método consiste no ajuste, onde for necessário, dos dados do sistema elétrico de distribuição, criando uma rede fictícia onde é possível o método de Newton Desacoplado Rápido realizar a convergência gerando resultados confiáveis. Posteriormente, são realizados testes no sistema unificado com a instalação de geração distribuída de pequeno porte ao longo da rede. Outra simulação realizada é com a mudança na configuração da rede de distribuição, fazendo com que a mesma opere em anel (paralelismo de alimentadores).

Palavras-chave: Fluxo de potência, Desacoplado Rápido, Rotação de Eixos, Fluxo de Potência Unificado.

ABSTRACT

Short-term, medium-term and long-term studies for both the planning and operation of electrical systems are based on simulations of power flow in networks using well-established computational tools and solution methods. The methods used for transmission systems differ from those used for distribution systems. This paper puts forward a strategy for calculating power flow in a system consisting of a transmission network with ring connections connected to a radial distribution network. The connection between the two networks is by means of transformers. The proposed method is based on the Newton Fast Decoupled method using rotation of the axes in the distribution system. The method involves adjusting, where necessary, the data for the electrical distribution system to create a fictitious network in which the Newton Fast Decoupled method can be applied to achieve convergence and yield reliable results. Tests are then carried out on the unified system with small-scale distributed generation connected along the network. Another simulation is carried out with the configuration of the distribution network changed so that it operates as a ring (feeders in parallel).

Keywords: Power flow, Fast decoupled, Axis rotation, Unified power flow.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 MOTIVAÇÃO	13
1.3 OBJETIVO E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	14
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA ELÉTRICO	23
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.....	26
2.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUÇÃO DE SISTEMA ALGÉBRICOS.....	26
2.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA	28
2.2.1 Subsistema 1.....	30
2.2.2 Subsistema 1 - Aplicação do Método de Newton	30
2.3 ALGORITMO BÁSICO PARA A RESOLUÇÃO DOS SUBSISTEMAS 1 E 2 PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.....	34
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DESTE CAPÍTULO.....	35
3 MÉTODO DE NEWTON RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO	36
3.1 MÉTODO DE NEWTON DESACOPLADO.....	36
3.2 ALGORITMO BÁSICO PARA A RESOLUÇÃO DOS SUBSISTEMAS 1 E 2 PELO MÉTODO DESACOPLADO	37
3.3 MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO (NDR).....	39
3.4 VERSÕES DO MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO	41
4 MÉTODO DE NEWTON RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO COM ROTAÇÃO ÓTIMA DOS EIXOS.....	43
4.1 INTRODUÇÃO	43
4.2 RELAÇÕES R/X TÍPICAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO	44
4.3 ROTAÇÃO DE EIXOS COMPLEXOS	45
4.3.1 Representação Matemática do Método.....	46
4.4 MÉTODO DA NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE	48

4.5 EQUIVALÊNCIA ENTRE OS MÉTODOS.....	51
4.6 CÁLCULO DE ÂNGULO DE BASE OU ROTÇÃO	51
4.6.1 Ângulo Ótimo Orientado ao Ramo	52
4.6.2 Ângulo Ótimo Orientado a Barra	53
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	56
5. RESULTADOS.....	57
5.1 INTRODUÇÃO	57
5.2 SISTEMA TESTE PADRÃO	58
5.2.1 Caso de 10 Barras	58
5.2.2 Caso de 34 Barras	62
5.2.3 Caso de 70 Barras	65
5.2.4 Casos Base com Inclusão de Geração Distribuída	69
5.3 ALIMENTADORES REAIS	70
5.4 CASO UNIFICADO	78
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	89
6 CONCLUSÃO	90
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO 1 - DADOS E RESULTADOS	94
ANEXO 2 - SISTEMA DE 14 BARRAS EM ANEL	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DO SISTEMA DE 10 BARRAS	59
TABELA 2 - VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X SISTEMA DE 10 BARRAS.....	59
TABELA 3 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 10 BARRAS:VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X	60
TABELA 4 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 10 BARRAS: VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS	60
TABELA 5 - SISTEMA DE 10 BARRAS: RESULTADO COM ANAREDE.....	61
TABELA 6 - SISTEMA DE 10 BARRAS: RESULTADOS COM MATLAB	61
TABELA 7 - RESULTADOS PELO ANAREDE E MATLAB SEM ROTAÇÃO DOS EIXOS	62
TABELA 8 - DADOS DOS ALIMENTADORES 1 E 2 LIGADOS EM PARALELOS.....	76
TABELA 9 - TENSÕES NAS BARRAS DURANTE O PARALELISMO	77

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

QUADRO 1- RESUMO GERAL DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA IMPEDÂNCIA TÍPICA DE ALTA TENSÃO	44
QUADRO 2 - RELAÇÃO DE R/X POR NÍVEL DE TENSÃO	45
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE IMPEDÂNCIA DE MEDIA TENSÃO	45
FIGURA 3 – ROTAÇÃO DOS EIXOS DA IMPEDÂNCIA	46
FLUXOGRAMA 1 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO PARA A REALIZAÇÃO DA ROTAÇÃO DOS EIXOS DAS IMPEDÂNCIAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	55
FIGURA 4 – CASO BASE DE 10 BARRAS	59
FIGURA 5 - CASO BASE DE 34 BARRAS	63
FIGURA 6 – CASO BASE DE 70 BARRAS	66
QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS 3 SISTEMAS TESTE DO IEEE	68
QUADRO 4 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	70
FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO DOS ALIMENTADORES 1 E 2 DO CASO REAL	71
QUADRO 5 - DADOS DOS ALIMENTADORES 1 E 2 ANTES E APÓS A ROTAÇÃO DOS EIXOS	72
QUADRO 6 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS	73
FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO DE DUAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL EM PARALELO	74
FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO COM PARALELISMO	75
FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO SISTEMA UNIFICADO DE 14 BARRAS COM SISTEMA DE 10 BARRAS	79
QUADRO 7– POTÊNCIA DA BARRA 9	80
FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL DOS DOIS ALIMENTADORES	84
FIGURA 12 - CONFIGURAÇÃO DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL DOS DOIS ALIMENTADORES EM PARALELO	87

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PERFIL DO MODO DE TENSÃO (PU)	64
GRÁFICO 2 – PERFIL DO ÂNGULO (°)	64
GRÁFICO 3 – PERFIL DO MODO DE TENSÃO (PU)	67
GRÁFICO 4 – PERFIL DO ÂNGULO (°)	67
GRÁFICO 5 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	81
GRÁFICO 6 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	81
GRÁFICO 7 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA BARRA 25- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	82
GRÁFICO 8 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA BARRA 25- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	83
GRÁFICO 9 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	85
GRÁFICO 10 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	86
GRÁFICO 11 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL EM PARALELO - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	88
GRÁFICO 12 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL EM PARALELO - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

NB - número de barras da rede

NR - número de ramos da rede

G - matriz condutância nodal

B - matriz susceptância nodal

$Y = G + jB$ - matriz admitância nodal

R - matriz resistência nodal

X - matriz reatância nodal

$Z = R + jX$ - matriz impedância nodal

G_{km}, B_{km} - elementos (k, m) das respectivas matrizes G e B

R_{km}, X_{km} - elementos (k, m) das respectivas matrizes R e X

V_k - magnitude de tensão da barra k

θ_k - ângulo de tensão da barra k

θ_{km} - abertura angular: $\theta_k - \theta_m$

K - conjunto de todas as barras conectadas à barra k, incluindo a própria barra k

$\Omega_k = K - \{k\}$ - conjunto de todas as barras conectadas à barra k, excluindo a barra k

P_k - potência ativa injetada na barra k

Q_k - potência reativa injetada na barra k

g_{km} - condutância do ramo k - m

b_{km} - susceptância do ramo k - m

$y_{km} = g_{km} + jb_{km}$ - admitância do ramo k - m

r_{km} - resistência do ramo k - m

x_{km} - reatância do ramo k - m

$z_{km} = r_{km} + jx_{km}$ - impedância do ramo k - m

FPDR-RE – Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com Rotação Ótima dos Eixos

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência está passando por um momento de mudança de seus conceitos e aplicações. A produção de energia elétrica que no início era de pequena potência e operava próxima aos centros de consumo foi evoluindo para usinas de grande potência instaladas em pontos cada vez mais distantes, com a necessidade de sistemas de transmissão cada vez mais complexos tanto no ponto de vista de operação como manutenção, sendo ainda, que os impactos ambientais de grandes usinas geradoras estão sendo cada vez mais questionados, novamente está sendo idealizada a utilização da geração de pequeno porte junto à carga, sendo agora contextualizada como geração distribuída.

Já a rede de distribuição é o segmento do sistema elétrico onde estão ocorrendo as maiores mudanças e implantação de novos conceitos, devido ao grande avanço nas tecnologias de comunicação, medição e automação. Este novo conceito de rede está sendo conhecido como Smart-Grid e está provocando uma nova análise sobre os métodos e aplicações das redes de distribuição de energia elétrica de média tensão, bem como na rede de alta tensão, visto que agora este começa a ter uma interferência causada pelo sistema de distribuição.

Atualmente os fluxos de carga utilizados pelas Concessionárias de Energia são tratados de maneira independente, sendo utilizado um método para alta tensão e outro para o sistema de distribuição.

Na alta tensão, onde se opera com tensões acima de 69 KV, é utilizado o método de Newton-Raphson com suas variações: Completo, Desacoplado e Desacoplado Rápido [1], sendo esses sistemas de cálculos bem desenvolvidos e com embasamentos teóricos e práticos comprovados.

No sistema de distribuição de energia, onde se opera com tensões menores de 35KV, o método mais utilizado é o Backward-Forward, chamado também de Back-Forward Sweep [2]. Esse método também possui uma literatura técnica bem desenvolvida e estruturada.

1.1 JUSTIFICATIVA

Tanto os métodos de Newton-Raphson como o método Backward-Forward tiveram o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento de forma independente, não

considerando a possibilidade de um sistema interagir com outro. Criando assim um tipo de “fronteira” onde os resultados de um sistema elétrico de alta tensão devem ser trabalhados para serem introduzidos como fontes para as redes elétricas de média tensão.

O sistema elétrico de alta tensão teve a sua regulamentação técnica definida há muito mais tempo que o sistema elétrico de média tensão, que ainda se encontra em fase de aprimoramento e depuração das regras estabelecidas. No final de 2009 a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) colocou em vigor uma série de documentos chamados de PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, que estabelece novas regras, regulamentações e procedimentos para o sistema de distribuição incluído as solicitações de acessantes de geração distribuída que podem ser realizadas desde a alta tensão até a baixa tensão com uma faixa de variação de quilowatts a megawatts. O PRODIST também define novos fatores de qualidade da energia distribuída, passando a monitorar o tempo de interrupção de energia e a frequência com que a energia é interrompida em cada consumidor, fazendo com que fiquem cada vez mais rígidas as penalidades por violação das metas. Isto com a finalidade de proporcionar aos consumidores uma energia com fornecimento confiável e de custos reduzidos.

Diante deste cenário em evolução, foi verificada a necessidade de uma nova técnica que permitisse o sistema de distribuição interagir com o sistema de alta tensão e vice-versa. Sendo assim, foi realizado um levantamento de trabalhos desenvolvidos que permitissem realizar simulações de fluxo de potência de maneira confiável, considerando o sistema elétrico de distribuição com as novas configurações e mudanças, e foi localizado o método desacoplado rápido com rotação dos eixos, para ser aplicado em redes de distribuição, sendo que a partir desta metodologia foi idealizada a possibilidade de realizar a unificação dos fluxos de potência utilizando uma única ferramenta computacional e um único método metodológico.

1.2 MOTIVAÇÃO

Com a rede elétrica cada vez mais interligada e a necessidade de atendimento a requisitos de qualidade cada vez mais rígidos, aliados a entrada cada

vez maior de geração distribuída no sistema de distribuição, verifica-se a necessidade de novas práticas operacionais. Essas práticas buscam, principalmente, evitar os desligamentos de consumidores para a realização de intervenções na rede elétrica e criam a necessidade de se utilizar uma metodologia de cálculo de fluxo de potência onde seja possível a análise do sistema elétrico de transmissão e de distribuição como um todo [3]. As limitações de aplicação do método Backward-Forward para redes exclusivamente radiais [2] e do método de Newton-Raphson (e suas variações desacopladas) para redes de altas tensões, onde se verifica a predominância da reatância de série das linhas com relação às suas resistências, aliadas a atual necessidade de integração entre redes de transmissão e distribuição inspirou o atual projeto de desenvolvimento de uma ferramenta unificada de fluxo de potência.

1.3 OBJETIVO E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A dissertação propõe uma estratégia unificada de cálculo de fluxo de carga em um sistema composto da rede de transmissão conectada com seus alimentadores de distribuição, pois até o momento os estudos são tratados por métodos distintos [3]. Sendo na alta tensão utilizado o método de Newton e suas variações e na distribuição o método Backward-Forward. A metodologia proposta consiste na utilização do Método Newton Desacoplado Rápido para todo o sistema (transmissão e distribuição), o que é viabilizado através da aplicação de técnicas de rotações dos eixos para os alimentadores da rede de distribuição, onde a relação da resistência pela reatância está acima dos valores adequados para aplicação dos métodos desacoplados

O Newton Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos [5] aplicado recentemente em [4] é resgatado nesse trabalho com o objetivo de ajustar os dados de rede (resistência e reatância) da rede de distribuição e deixá-los relativos aos sistemas de transmissão e criar um sistema único para realização do cálculo do fluxo de potência. Cabe salientar que em [3] os autores propõem o tratamento de redes de transmissão e distribuição, porém utilizando ferramentas de cálculo de fluxo de potência distintas para os sistemas de transmissão e distribuição, o que implica na realização da análise em duas etapas. Com relação à referência [4], os autores propõem o uso de rotações de eixo para o uso do método desacoplado,

abrangendo apenas sistemas de distribuição.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde sua formulação inicial, na década de 60, muitos métodos tem sido propostos para resolver o problema de fluxo de potência para sistemas de distribuição radiais. Alguns deles serão destacados a seguir por ordem cronológica:

1 - Nos anos 50, empregava-se o método de Gauss-Siedel para a resolução do fluxo de potência. Apesar de eficiente, é considerado muito lento, pois necessita de um número excessivo de iterações para encontrar a solução. Aliado à baixa capacidade de processamento dos computadores da época, o método tornava-se pouco utilizável.

2 - W.F. Tinney ET AL. (1967) apresenta a resolução do problema de fluxo de potência pelo método Newton-Raphson, cujo desenvolvimento considera apenas as características dos sistemas de transmissão de energia (sistemas malhados), sem explorar computacionalmente características típicas de redes de distribuição (redes radiais). O Método de Newton passou a ser uma referência no cálculo do fluxo de potência para redes malhadas, pois apresenta uma convergência rápida e eficiente.

3 - R. Berg ET AL (1967) “Mechenized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits é o primeiro trabalho desenvolvido exclusivamente para sistemas de distribuição, que pode ser considerado como base para o sistema Backward/Forward e para todas as variantes que seguiram após a efetivação do método.

Porém, enquanto muitos pesquisadores buscavam aperfeiçoar e desenvolver técnicas para resolver o problema de FP voltado para redes de transmissão, as pesquisas para as redes de distribuição não tiveram tanta ênfase. Os estudos de FP para distribuição eram realizados com pouca ou nenhuma análise.

4 - W. H. Keresting e D.L. Mendive (1976) apresentaram uma abordagem para solução do problema de fluxo de potência para redes radiais: aplicação da técnica “ladder” para sistemas de distribuição.

No final dos anos 80, com a modernização da legislação e o aumento da competitividade, bem como a necessidade de uma melhora da qualidade da energia fornecida, como decorrência do aparecimento de cargas sensíveis com a variação

da tensão, o setor da distribuição de energia passou a ser estudado de maneira mais intensa.

5 - A. V. Garcia, A. J. Monticeli et al (1984). propõem um método para solução do fluxo de potência na distribuição utilizando o método Desacoplado Rápido, pois apresenta uma convergência rápida e eficiente. No entanto, propõem uma modificação no método para compensar a alta relação de resistência e reatância nas linha r/x encontradas nos sistemas de distribuição, que provoca dificuldades na convergência para esses sistemas. A modificação proposta é a rotação dos eixos das impedâncias, fazendo com que a rede de distribuição assumam parâmetros de uma de alta tensão.

6 - D. Rajjicic e A. Bose (1988) também utilizam o Método Desacoplado Rápido, mas com a proposta de inserção de dois coeficientes – 0,4 e 0,3 – determinados experimentalmente nas equações das matrizes B' e B'' [1]. Os autores não demonstram a metodologia de obtenção dos coeficientes.

7 - D. Shimohammadi et al. (1976) propõem paralelamente o método Backward/Forward Sweep, baseado na técnica Ladder, proposta por W.H. Kersting et al. (1976). O método de resolução consiste em dois passos básicos: varredura – backward – onde são calculados as correntes ou fluxos de potência nas linhas, iniciando das barras finais em direção a subestação e a varredura; e forward - que realiza os cálculos das quedas de tensão com as atualizações das correntes ou fluxos de potência, que parte da subestação em direção as barras no final dos alimentadores. Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo. Por possuir boas características de convergência e ser muito robusto tornou-se o principal método de solução e serviu como base para muitos métodos propostos posteriormente. Este método pode ser aplicado também para sistemas fracamente malhados, ou seja, sistemas que apresentam poucas interligações, onde são convertidos em redes radiais.

8 - M. E. Baran e F. F. Wu (1989) apresentaram o método baseado no método Newton-Raphson, porém levando em consideração as características dos sistemas de distribuição, o que torna esse método exclusivo para sistemas radiais de energia elétrica. O método propõe um novo modelo de equações para o cálculo de fluxo de potência, diferente, portanto, das equações de fluxo de potência para sistemas de transmissão. Essas equações são denominadas pelos autores de “equações de fluxo de ramos” ou então “DistFlow”. Outra melhoria importante para a

convergência do método é o uso de uma matriz de sensibilidade (Jacobiana) modificada que atende a características radiais dos sistemas de distribuição. H.D. Chiang (1991) apresenta o método de uma maneira mais detalhada onde realiza um estudo dos algoritmos e convergência.

9 - R. Céspedes (1990) apresentou o método Soma de Potências, baseado no método Backward/Forward. O método Soma de Potências tem como característica básica a possibilidade de transformar o problema de cálculo em um conjunto de subproblemas que, por sua vez, podem ser resolvidos através das equações que relacionam as tensões entre dois nós de um alimentador de distribuição com as potências equivalentes dos nós. Essa potência equivalente é a soma de todas as potências a jusante da barra, incluindo as perdas, e são alocadas na posição correspondente a barra (carga equivalente), ou seja, calcula-se as cargas equivalentes para cada barra de carga. Este procedimento se dá no sentido das barras terminais para as subestações. Então, partindo da barra da subestação, calculam-se as tensões do lado da carga para todas as barras. Com as novas tensões recalculam-se as perdas e com isto recalculam-se as novas cargas. Dessa forma, o processo de solução é realizado de dois em dois nós, e respeitado até que a tensão em cada nó do sistema seja determinada e o erro se torne uma tolerância especificada.

10 - Tsai-Hsiang Che et al (1991) utiliza uma aproximação do método Gauss Zbarra. É baseado no princípio da superposição aplicada às barras de tensão dos sistemas, ou seja, existem duas contribuições para cálculo da tensão: uma proveniente da alimentação da subestação e outra do equivalente de injeção de corrente. As cargas, capacitores e reatores são modelados como fontes equivalentes de injeções de correntes. Então o cálculo do fluxo de potência se baseia no método da superposição.

11 – A. S. Barbosa, E. Colman , et al (1992) apresenta um trabalho onde é realizado a comparação da utilização do fluxo de potência em redes de distribuição utilizando-se o método da rotação de eixos e da soma equivalente de potência, mostrando que ainda não existia uma unanimidade sobre quais propostas seriam mais eficientes para o problema do fluxo de potência para as rede de distribuição.

12 - S.K. Goswani e S.K. Basu (1992) , o processo de resolução é iniciado a partir da subestação, considerando as “cargas equivalentes” da mesma forma que R. Cepedes (1990) propôs. A diferença está na primeira iteração, onde não são levadas

em conta as perdas das linhas, e também no equacionamento, já que neste método ele utiliza o fluxo de correntes nos ramos. A cada iteração então são encontradas novas perdas no sistema que são utilizadas no processo do método Soma de Potência.

13 - D. Rajicic et al. (1994) propuseram um método que se baseia na ordenação e orientação da matriz impedância Z junto com o método da Soma das Potências, porém, o método se demonstra eficiente apenas para redes fracamente malhadas.

14 - C.S. Chen e D. Shirmohammadi (1995) apresentam um método para sistemas de distribuição trifásicos desequilibrados, também baseados no método Backward/Forward Sweep, mas com a diferença no equacionamento, pois o cálculo das tensões utiliza a matriz impedância Z .

15 - R. D. Zimmerman e H. D. Chiang (1995) é o método desacoplado rápido para sistemas de distribuição. Foi baseado na formulação proposta por M.E. Baran e F.F. Wu, mas com a diferença de utilizar o fluxo de corrente nos ramos, ao invés de utilizar as potências como no método original. Utiliza uma matriz jacobiana aproximada e com isso consegue diminuir o tempo computacional, já que é necessária somente uma inversão da matriz.

16 - D. Das et al (1995) apresenta um novo método para resolver o fluxo de potência nas redes de distribuição radiais baseado no método da soma de potências. O método proposto envolve só a avaliação de uma expressão algébrica das magnitudes de tensão e nenhuma função trigonométrica. A solução do problema do fluxo de potência é feita por meio do cálculo iterativo dos módulos de tensão das barras, em função da potência ativa que circulam nos ramos. O critério de convergência está baseado na diferença entre as perdas ativas e reativas em duas iterações subseqüentes.

17 - M. H. Haque (1996) propõem um método que pode ser aplicado a ambos os tipos de rede – malhada e radial. Se a rede for malhada, é convertida em uma radial para o cálculo do fluxo de potência e utiliza o método de injeções de corrente nos pontos em que houve a abertura da malha; na rede radial equivalente é realizado cálculo através do método da matriz impedância reduzida, baseado no método proposto por T.H. Chen et al (1991).

18 - F. Zhang e C. S. Cheng (1997) o método proposto é baseado no método de Newton, modificado para atender as características dos sistemas de

distribuição radiais. A matriz Jacobiana assume a forma UDU^t , onde U é uma matriz constante triangular superior que depende somente da topologia de sistema e D é um bloco matriz diagonal, sendo o resultado de estrutura radial e propriedades especiais do sistema de distribuição. No processo iterativo é utilizado uma metodologia baseada no Backward/Forward Sweep e o equacionamento do fluxo de carga é baseado no método da matriz impedância Z_{barra} . Os autores não explicitam a montagem da matriz jacobiana. O método proposto pode ser utilizado em outras aplicações, como na estimação de estado, e também pode ser estendido à solução de sistemas fracamente malhados, com geração distribuída e sistemas trifásicos (desequilibrado).

19 - Y.H. Moon et al (1999) , o método proposto é aplicado para solução de sistemas de distribuição radiais e malhados. Esse método também é baseado no método de Newton, mas diferentemente da formulação apresentada por F. Zhang e C. S. Cheng (1997), que resolvem pela matriz impedância Z , nesse trabalho utiliza-se a matriz admitância. A matriz Jacobiana, em sistemas monofásicos, é dividida em duas matrizes, sendo que ambas são formadas por blocos (2×2) . A primeira matriz é formada pelas partes real e imaginária da matriz admitância Y_{barra} do sistema e se mantém constante durante as iterações. O Vetor ΔI (variação da corrente) também é atualizado durante o processo iterativo. As tensões da barras do sistema são atualizadas até atingirem a convergência (ΔP e ΔQ foram menores ou iguais à tolerância estipulada).

20 - A.G. Exposito e E.R. Ramos (1999), apresentaram um método para resolver o problema de fluxo de potência em redes radiais. O algoritmo apresentado segue uma aproximação diferente, apontada para aumentar a taxa de convergência. Este método está baseado na idéia intuitiva que quanto mais linear um sistema de equações for, melhor é sua taxa de convergência. Para alcançar esta meta, as equações de fluxo de carga foram escritas em termos de variáveis “alternativas” que conduzem a um conjunto de $3N$ equações ($2N$ equações lineares e N quadrático) para uma rede com $N+1$ barras. Um algoritmo computacional, baseado no método de Newton-Raphson, é proposto para resolver o sistema de equação resultante.

21 - M. H. Haque (2000) calcula o fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais ou fracamente malhados. O sistema de distribuição é convertido primeiro a uma rede de fonte equivalente com configuração radial. Conforme artigo do autor de 1996, a diferença está no cálculo do fluxo de potência, que é neste

trabalho calculado utilizando as equações proposta por M.E. Baran e F.F. Wu (1989): equações DistFlow . As características do sistema original são preservadas injetando potência apropriada nos pontos em que foram abertos os circuitos no sistema equivalente. As potências injetadas são calculadas e atualizadas durante o processo iterativo.

22 - P.A. N. Garcia et al (2000) onde o método proposto é baseado no método Newton-Raphson, chamado de Método de Injeção de Corrente, e é aplicado para soluções de sistemas trifásicos, com cargas desequilibradas, em que as equações das correntes injetadas são descritas em coordenadas retangulares e a matriz jacobiana é formada por blocos (6X6) e será aproximadamente igual á matriz admitância nodal, sendo esta variação determinada pelo modelo de carga adotado.

A matriz jacobiana pode ou não ser atualizada durante o processo iterativo, visto que o numero de iterações, sendo ela constante, é um pouco maior.

23 - S. Jovanovic e F. Milicevic (2000), exploram a topologia espacial dos sistemas de distribuição para formular o método triangular de fluxo de carga de distribuição. Utiliza em sua formulação uma matriz triangular T, que é formada por $N_{barras} \times N_{barras}$, constante durante o processo iterativo. Após a formulação da matriz, calcula-se o fluxo de potência através de um processo baseado no backward Sweep. A vantagem deste método é a simplicidade de sua formulação.

24 - A. Augugliaro et al (2002) apresentam um método de solução para sistemas de distribuição. O método é valido tanto para sistemas radiais quanto para sistemas fracamente malhados. As tensões nas barras são consideradas com variáveis de estado. O método de solução é baseado no método iterativo backward/forward sweep, modificado para aumentar a velocidade de convergência.

25 - R. Ranjan e D. Das (2003) onde o método proposto para solução do fluxo e potência em sistemas radiais, é baseado no método proposto por M.E. Baran e F. F. Wu (1989). A vantagem do método proposto é que todos os dados são armazenados em forma de vetor, além de poder ser utilizado com o sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e DAC (Distribution Automation and Control).

26 - T. L. Baldwins S.A. Lewis (2003) de apresentam uma revisão dos métodos clássicos e propõe uma nova metodologia, baseado no trabalho de S. Jovanovic e F. Milicevic (2000) e no método Backward/Forward Sweep. Outra contribuição do método apresentado está na inclusão de múltiplas gerações, ou

seja, não somente uma fonte (subestação) de alimentação.

27 - R. Ciric et al. (2004) apresenta uma metodologia baseada no método Backward/ Forward Sweep para cálculo de fluxo de potência de sistemas de distribuição com retorno por terra.

O Quadro 1 apresenta resumo geral da revisão bibliográfica, indicando a origem de cada método e sua particularidade em se permitir trabalhar com Geração Distribuída e redes em anel, fracamente malhadas ou radiais, é apresentado a seguir.

Número ref.	Método	Método Origem	Sistema	Permite uso GD	Operação em Anel
1	Gauss-Siedel	-	Transmissão	Sim	Sim
2	Newton-Raphson	1	Transmissão	Sim	Sim
3	Formulação da proposta do Backward/Forward	-	Distribuição	Não	Não
4	Proposta de uso da técnica “ladder”	2	Transmissão Adaptado	*	*
5	Variação do Desacoplado Rápido	1	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
6	Variação do Desacoplado Rápido	1	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
7	Backward/Forward Sweep	3	Distribuição	Não	Não
8	Newton-Raphson Adaptado (DistFlow)	2	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
9	Soma de Potências	6	Distribuição	Não	Não
10	Gauss Aproximado	1	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
11	Variação do	1/6	Transmissão	Sim	Sim

	Desacoplado Rápido/ Soma de Potências		Adaptado/ Distribuição		
12	Soma de Potências Variação	8 e 6	Distribuição	Não	Não
13	Soma de Potências Variação	8	Distribuição	Não	Fracamente malhada
14	Backward/Forward Sweep – rede trifásica	3	Distribuição	Não	Fracamente malhada
15	Variação do Desacoplado Rápido	1 e 5	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
16	Soma de Potências Variação	8 e 6	Distribuição	Não	Fracamente malhada
17	Injeções de Corrente e Método de Gauss	1, 9 e 11	Transmissão Adaptado e distribuição	Sim	Sim
18	Newton, Modificado	2	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
19	Newton, Modificado	2 e 16	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
20	Newton, Bem Modificado	2	Transmissão Adaptado	Sim	Sim
21	Newton-Raphson Adaptado (DistFlow)	7 e 2	Transmissão Adaptado	Sim	Fracamente malhada
22	Newton-Raphson Adaptado e Injeção de Corrente	7 e 15	Transmissão Adaptado	Sim	Fracamente malhada
23	Triangular de Fluxo de Carga de Distribuição.		Distribuição	-	-

24	Backward/Forward Sweep – rede trifásica – Modificado	3 e 12	Distribuição	Não	Fracamente malhada
25	Backward/Forward Sweep – rede trifásica - Modificado	3	Distribuição	Não	Fracamente malhada
26	Backward/Forward Sweep – rede trifásica	3 e 23	Distribuição	Sim	Fracamente malhada
27	Backward/Forward Sweep – rede trifásica e Monofásica	3 e 23 e 24	Distribuição	Sim	Fracamente malhada

QUADRO 1 - RESUMO GERAL DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

FONTE: O Autor

1.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico de transmissão é composto por uma rede malhada de linhas, com tensões variando de 69 kV até 765 kV com capacidade de transmissão de grande quantidade de energia, algo na ordem de centenas de MVA. O termo rede malhada de transmissão se deve ao fato de ter mais de um “caminho elétrico” entre dois pontos do sistema, facilitando o fluxo de potência. Pequenos trechos operando de forma radial podem ser encontrados nas redes de transmissão. Estes casos são pouco freqüentes e contemplam pequenas distâncias, portanto, não apresentam maiores prejuízos à característica malhada dos sistemas de transmissão.

Já os sistemas de distribuição são basicamente radiais, caracterizados por ter um único caminho entre cada consumidor e o alimentador de distribuição. O fluxo de potência flui da subestação para os consumidores através de um caminho simples, o qual, em caso de interrupção, resulta na perda total de potência para os consumidores à jusante do defeito. Os sistemas radiais de distribuição podem apresentar uma característica de *fracamente malhados*, termo adotado para indicar

a possibilidade de realização da interligação de dois ramais de um mesmo alimentador, sem que seja necessário o desligamento deste alimentador.

Outra condição de operação do sistema de distribuição denominada *paralelismo* consiste em se ter a possibilidade de conexão entre dois alimentadores distintos através de uma chave seccionadora. Esta configuração disponibiliza dois caminhos distintos entre a fonte de potência e os consumidores. Podendo ser duas subestações diferentes, a mesma subestação com dois transformadores diferentes ou mesmo o mesmo transformador. Este sistema por ser mais complexo que o sistema radial em termos de proteção do sistema, só pode ser adotado de maneira momentânea, com uma duração máxima da ordem de dezenas de minutos. A sua vantagem está na melhoria do serviço de entrega de energia, que passa a não ser interrompido para a maioria dos consumidores quando um segmento da rede é desligado, uma vez que existe um caminho alternativo para o fluxo de potência, através do fechamento da citada chave de interligação.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2 o método de Newton-Raphson é apresentado de maneira resumida, objetivando o entendimento de sua variação, o método Desacoplado Rápido.

No capítulo 3 o método Desacoplado Rápido é apresentado de maneira resumida, objetivando o entendimento posterior das modificações a serem introduzidas pela nova metodologia.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta no trabalho, tanto para a resolução da rotação dos eixos de resistências e admitância como a metodologia de escolha do melhor ângulo de rotação.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações com a aplicação da metodologia proposta para os sistemas de distribuição radial IEEE de 10 barras, 34 barras e 70 barras adicionados ao caso de transmissão em anel IEEE de 14 barras. Também são apresentados os resultados das simulações de um sistema de distribuição real acoplado ao caso de transmissão em anel IEEE de 14 barras. Em todos os casos bases foi incluído um sistema de geração distribuída e no caso real foi realizado um paralelismo entre os dois sistemas de distribuição.

As conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas

no capítulo 6.

2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O método de Newton-Raphson é uma ferramenta numérica bastante utilizada para resoluções de sistemas de equações não-lineares e consiste basicamente num processo no qual iterações lineares dos sistemas são montadas e resolvidas. Com estas características este método ficou sendo um dos principais para soluções de cálculo de fluxo de potência de redes elétricas, principalmente para redes malhadas como os sistemas de transmissão.

2.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUÇÃO DE SISTEMAS ALGÉBRICOS.

O método de Newton parte da consideração de um sistema unidimensional onde se deve determinar o valor de x tal que a função $g(x)=0$. Em termos geométricos, a solução da equação $g(x)$ corresponde ao ponto onde a curva desta equação corta o eixo x . A solução deste problema pelo método de Newton-Raphson segue a seguinte seqüência:

- a) Fazer $k=0$ e escolher uma solução inicial $x = x^{(k)} = x^{(0)}$;
- b) Calcular o valor da função $g(x)$ no ponto $x = x^{(k)}$;
- c) Comparar o valor calculado de $g(x)$ com a tolerância especificada \mathcal{E} ;
- d) Se $|g(x)| \leq \mathcal{E}$, então $x = x^{(k)}$ será a solução do problema; se $|g(x)| > \mathcal{E}$ deve-se prosseguir na metodologia;
- e) Linearizar a função $g(x)$, por série de Taylor, em torno do ponto $x^k; g(x^k)$, ficando:

$$g(x^k + \Delta x^k) = g(x^k) + g'(x^k)\Delta x^k \quad (2.1)$$

Sendo $g'(x) = dg/dx$

- f) Encontrar Δx , tal que

$$g(x^k) + g'(x^k)\Delta x^k = 0 \quad (2.2)$$

Ou seja, a nova estimativa passa a ser:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.3)$$

Onde

$$\Delta x^k = -g(x^k) / g'(x^k) \quad (2.4)$$

g) Fazer $k+1 = k$ e voltar ao item b.

Considerando um sistema de n-equações algébricas não-lineares, teremos:

$$\underline{g}(\underline{x}) = [g_1(\underline{x}), g_2(\underline{x}), \dots, g_n(\underline{x})]^T \quad (2.5)$$

$$\underline{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \quad (2.6)$$

Seguindo o mesmo procedimento para uma equação unidimensional, teremos:

$$g(\underline{x}^k + \Delta \underline{x}^k) \cong g(\underline{x}^k) + J(\underline{x}^k) \Delta \underline{x}^k \quad (2.7)$$

Onde a linearização da função $\underline{g}(\underline{x})$ é dada apenas pelos dois primeiros termos da série de Taylor e J é a matriz Jacobiana dada por:

$$J = \frac{\delta \underline{g}}{\delta \underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\delta g_1(\underline{x})}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta g_1(\underline{x})}{\delta x_n} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \frac{\delta g_n(\underline{x})}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta g_n(\underline{x})}{\delta x_n} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.8)$$

E calcula-se o vetor de correção $\Delta \underline{x}^k$ por:

$$\Delta \underline{x}^k = -[J(\underline{x}^k)]^{-1} \cdot \underline{g}(\underline{x}^k) \quad (2.9)$$

A solução deste problema pelo método de Newton-Raphson segue a seguinte seqüência:

- a) Fazer $k=0$ e escolher uma solução inicial $\underline{x} = \underline{x}^{(k)} = \underline{x}^{(0)}$;
- b) Calcular o valor da função $\underline{g}(\underline{x}^k)$;
- c) Testar a convergência de $\underline{g}(\underline{x}^k)$: se $|g_i(\underline{x}^k)| \leq \varepsilon$ para $i=1,n$ o processo convergiu para a solução \underline{x}^k e termina o processo, senão, continuar o processo;
- d) Calcular a Matriz Jacobiana $J(\underline{x}^k)$;
- e) Determinar a nova solução:

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + \Delta \underline{x}^k \quad (2.10)$$

$$\Delta \underline{x}^k = -[J(\underline{x}^k)]^{-1} \cdot \underline{g}(\underline{x}^k) \quad (2.11)$$

- f) Fazer $k+1 = k$ e voltar ao item b

2.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

A seguir iremos demonstrar resumidamente o desenvolvimento do método de Newton para a solução de fluxo de potência.

Esse método toma como base as equações de potência nodais para as barras da rede das correntes, resultantes da aplicação da lei de Kirchhoff. As injeções de potência ativa e reativa na barra k podem ser expressas por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.12)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.13)$$

Onde $k = 1, NB$; sendo NB o número de barras da rede.

As equações (2.12) e (2.13) indicam a existência de 4 variáveis por barra, quais sejam, injeção de potência ativa, injeção de potência reativa, modulo e ângulo da tensão na barra: V_k , θ_k , P_k e Q_k . Essas variáveis nodais podem configurar como incógnitas ou dados de entrada dependendo da classificação da barra, definida em três tipos:

- 1 - Barra tipo PQ – são especificados os valores de P_k e Q_k e calculados os valores de V_k e θ_k .
- 2 - Barra tipo PV – são especificados os valores de P_k e V_k e calculados os valores de V_k e θ_k .
- 3 – Barra de Referência - são especificados os valores de V_k e θ_k e calculados os valores de P_k e Q_k .

Para se obter o estado da rede é necessário conhecer os valores das magnitudes das tensões (V) e os ângulos de fase (θ) destas tensões de todas as barras do sistema. A partir desses fatores, conhecendo-se também os parâmetros do sistema de transmissão, é possível determinar a distribuição de fluxo através de todo o sistema [1].

Tem-se, assim, para cada barra, duas equações de potências nodais e duas variáveis conhecidas. As outras duas variáveis devem ser encontradas através do método de Newton-Raphson, criando-se assim um problema com $2NB$ equações e $2NB$ incógnitas:

$$\begin{cases} P_k - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \\ Q_k - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Normalmente um sistema elétrico é composto de NPQ barras do tipo PQ; NPV barras do tipo PV; e 1 barra do tipo V θ , tomada como referência para as tensões. Sendo assim, o sistema possui:

- 2 (NPQ + NPV + 1) variáveis especificadas
- 2 (NPQ + NPV + 1) incógnitas

Com isto foi criado um processo matemático que permite uma resolução mais rápida do sistema. Esse processo se resume em criar dois subsistemas, um para cálculo das variáveis de estado de todas as barras dos sistemas, ou seja, calcular V e θ para as barras PQ; e θ para as barras PV. Este subsistema é normalmente chamado de subsistema 1 [1]. O outro subsistema permite calcular as potências nodais de todas as barras dos sistemas, ou seja, P e Q da barra $V\theta$ e Q das barras PV, além da determinação da distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa das perdas do sistema. Este subsistema é normalmente chamado de subsistema 2 [1], e pode ser obtido diretamente, ou seja, sem a necessidade de processo iterativo.

A seguir iremos detalhar melhor o processo matemático para resolução do subsistema 1 que, por envolver solução de equações algébricas não-lineares, exige a aplicação de métodos iterativos.

2.2.1 Subsistema 1

Conforme já mencionado este subsistema permite obter os valores de V e θ desconhecidos das barras da rede.

Como para as barras do tipo $V\theta$ a solução já é conhecida, estas barras não entram nesta etapa; apenas as barras do tipo PQ e PV são consideradas, visto que os valores de V e θ são desconhecidos para as barras PQ e os valores de Q e θ são desconhecidos para as barras do tipo PV.

Tem-se, assim, um sistema determinado:

- (2NPQ + NPV) dados especificados: P e Q das barras PQ; P das barras PV
- (2NPQ + NPV) incógnitas: V e θ das barras PQ; θ das barras PV

Chamando de P_k^{esp} e Q_k^{esp} os valores conhecidos de P e Q então, o objetivo é resolver:

$$\begin{cases} P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \\ Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

2.2.2 Subsistema 1 - Aplicação do Método de Newton

As incógnitas do Subsistema 1 podem ser agrupadas no vetor de estado x , tal que:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Onde θ é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e tem dimensão (NPQ + NPV), e V é o vetor das magnitudes de tensões das barras PQ e tem dimensão NPQ.

Com o sistema (2.15) reescrito, podemos obter:

$$\begin{cases} \Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{calc} = 0 \\ \Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{calc} = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Sendo que:

- ΔP_k e ΔQ_k são os resíduos ou mismatches de potência ativa e reativa da barra k ;
- P_k^{esp} e Q_k^{esp} são os valores já conhecidos de P e Q;
- P_k^{calc} e Q_k^{calc} são calculados através das equações (2.12) e (2.13) de potências nodais.
- Os valores de ΔP_k obtidos são validos para as barras do tipo PQ e PV, já os valores de ΔQ_k são validos para as barras do tipo PQ.

Definindo a função vetorial $g(x)$ por:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (2.18)$$

Onde ΔP é um vetor de desvios de potência ativa de dimensão (NPQ + NPV) e ΔQ é um vetor de desvios de potência reativa de dimensão NPQ.

Pelo método iterativo de Newton, para cada iteração v , tem-se:

$$g(x^k) = -J(x^k) \cdot \Delta x^k \quad (2.19)$$

Onde:

- J a matriz Jacobiana das derivadas de $g(x)$ à x ;
- Δx é o vetor de correção de estado.

E estes são calculados a cada iteração.

Com o apresentado acima e realizando manipulações algébricas é possível obter-se o sistema linear do problema de fluxo de potência a ser resolvido a cada iteração v :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{(k)} x \begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Sendo assim, é possível perceber que a matriz Jacobiana é composta pelas submatrizes chamadas de H, N, M e L definidas por:

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad N = \frac{\partial P}{\partial V} \quad M = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad L = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2.21)$$

Como para redes de transmissão malhadas a matriz admitância Y é simétrica, é possível calcular os elementos de cada submatriz através das equações 2.22, 2.23, 2.24 e 2.25, indicadas a seguir:

$$\begin{cases} H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = B_{kk} V_k^2 - Q_k \\ H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H_{mk} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} = -V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (P_k + G_{kk} V_k^2) \\ N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{mk} = \frac{\partial P_m}{\partial V_k} = V_m (G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = G_{kk} V_k^2 + P_k \\ M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{mk} = \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (Q_k - B_{kk} V_k^2) \\ L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_{km} (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{mk} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} = -V_m (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \end{cases} \quad (2.25)$$

A dimensão de cada submatriz é:

- Matriz H: [(NPQ + NPV) × (NPQ + NPV)];
- Matriz N: [(NPQ + NPV) NPQ]
- Matriz M: [NPQ × (NPQ + NPV)]
- Matriz L: [NPQ × NPQ]

O vetor de correções de variáveis para uma determinada iteração é obtido através de:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{(k)} \right)^{(-1)} x \begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

A solução do processo iterativo ocorre quando, para um determinado estado (θ, V) , os desvios de potência estiverem bem próximos de zero, ou seja, as potências ativas e reativas calculadas para as barras do tipo PQ devem ser iguais ou estar bem próximas das especificadas. O mesmo vale para os valores das potências ativas das barras tipo PV.

Usualmente são determinadas as seguintes condições de convergência, utilizando os desvios de potência:

- $|\Delta P_k| \leq \epsilon_P$, para as barras k do tipo PQ e PV
- $|\Delta Q_k| \leq \epsilon_Q$, para as barras k do tipo PQ

Onde ϵ_P e ϵ_Q são as tolerâncias admitidas para os mismatches de potência ativa e reativa, respectivamente.

2.3 ALGORÍTMO BÁSICO PARA A RESOLUÇÃO DOS SUBSISTEMAS 1 E 2 PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

As etapas para a resolução do problema de fluxo de potência de carga pelo método de Newton-Raphson são descritas a seguir.

SUBSISTEMA 1

1. Fazer $v=0$ (contador de iterações) e escolher valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e as magnitudes das tensões das barras PQ, criando assim o vetor:

$$x = \begin{bmatrix} \theta^0 \\ V^0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2. Calcular $P_k(V^k, \theta^k)$ para as barras PQ e PV e $Q_k(V^k, \theta^k)$ para as barras PQ e determinar os respectivos desvios de potência: ΔP_k^v e ΔQ_k^v .

3. Testar a convergência: se $\max\{|\Delta P_k^v|\} \leq \epsilon_P$ e $\max\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \epsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (V^v, θ^v) , então ir para o passo 7. Caso contrário executar o passo seguinte.

4. Calcular a matriz jacobiana

$$\begin{bmatrix} H(\theta^k, V^k) & N(\theta^k, V^k) \\ M(\theta^k, V^k) & L(\theta^k, V^k) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

5. Calcular os vetores de correções resolvendo o sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\theta^k, V^k) & N(\theta^k, V^k) \\ M(\theta^k, V^k) & L(\theta^k, V^k) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P(\theta^k, V^k) \\ \Delta Q(\theta^k, V^k) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

E determinar a nova solução:

$$\begin{aligned} \theta^{k+1} &= \theta^k + \Delta\theta^k \\ V^{k+1} &= V^k + \Delta V^k \end{aligned}$$

6. Fazer ($k+1 = k$) e voltar ao passo 2.

SUBSISTEMA 2

7. Calcular P_k e Q_k para a barra de referência e Q_k para as barras tipo PV, calcular fluxos de potência ativa e reativa dos elementos da rede e calcular perdas.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DESTE CAPÍTULO

O método de Newton–Raphson, aplicado à resolução de fluxo de potência de redes elétricas, é hoje a mais difundida e robusta ferramenta usada para obtenção da solução dos valores das tensões complexas das barras do sistema. No entanto, sob certas condições, o método pode não apresentar convergência, como no caso de redes radiais, ou encontrar uma solução para o sistema, não-factível para a rede elétrica. Isto principalmente em redes de distribuição com características radiais onde dois fatores contribuem para a não convergência do sistema: um dos fatores seria, como já mencionado anteriormente, a relação r/x do sistema de distribuição ser diferente da relação r/x do sistema de transmissão e outra razão seria o condicionamento da matriz Jacobiana. Em [12] é apresentada análise onde se verifica que no caso de redes em anel (redes malhadas) a matriz Jacobiana apresenta a característica de ser diagonalmente dominante, ou seja, o elemento da diagonal principal é maior que a soma de todos os elementos da mesma linha, fora a diagonal. Em sistemas radiais esta característica não se repete, indicando que a convergência do sistema se torna mais difícil.

Com o passar do tempo este método foi aprimorado com diversos tipos de controle e limites, entre os principais podemos citar o controle dos valores de tensão das barras, injeção de potências ativas e reativas, bem como a inclusão de taps de transformadores. E também ocorreram implementações no método de Newton-Raphson para um melhor desempenho devido aos poucos recursos computacionais existentes anteriormente. Entre uma dessas variações está o Método de Newton Desacoplado Rápido (NDR) que será alvo de estudo do próximo capítulo.

3 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO

O método desacoplado e, subseqüentemente, o método desacoplado rápido foram desenvolvidos com uma variação do método de Newton-Raphson para que o processo de cálculo do fluxo de potência pudesse convergir de maneira mais rápida e para isso foram utilizadas algumas simplificações aproximações. O primeiro considera a existência de uma pouca sensibilidade entre [P e V] e entre [Q e θ]. O segundo vai além, realizando simplificações em algumas grandezas elétricas e obtendo uma notória redução de custo computacional.

A seguir iremos descrever resumidamente estes dois métodos.

3.1 MÉTODO DE NEWTON DESACOPLADO

No capítulo dois foram apresentadas as submatrizes H, N, M e L que compõem a matriz Jacobiana (J), as quais indicam as sensibilidades entre as potências (ativas e reativas) e as tensões complexas (magnitudes e ângulos de fase), sendo possível observar para estas submatrizes que as sensibilidades entre [P e θ] e entre [Q e V] são bem maiores que aquelas entre [P e V] e [Q e θ].

Quando existe uma sensibilidade forte entre duas variáveis se diz que existe um acoplamento forte e quando a sensibilidade é fraca pode-se dizer que existe um desacoplamento.

Com estas premissas foi deduzido o método de Newton Desacoplado no qual são desprezadas as submatrizes N e M, já que seus valores são substancialmente menores que os de H e L.

Utilizando estas simplificações é possível deduzir que:

$$\begin{cases} \Delta P(\theta^k, V^k) = H(\theta^k, V^k) \cdot \Delta \theta^k \\ \Delta Q(\theta^k, V^k) = L(\theta^k, V^k) \cdot \Delta V^k \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \\ V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \end{cases} \quad (3.2)$$

As equações (3.1) e (3.2) são chamadas de resolução simultânea, pois os mismatches de potências ativa e reativa são calculados com base nos valores de estado da iteração anterior.

Uma maneira de melhorar a característica de convergência do sistema é utilizando o esquema de solução alternado, no qual se tem:

$$\begin{cases} \Delta P(\theta^k, V^k) = H(\theta^k, V^k) \cdot \Delta \theta^k \\ \theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} \Delta Q(\theta^k, V^k) = L(\theta^k, V^k) \cdot \Delta V^k \\ V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \end{cases} \quad (3.4)$$

Sendo que o sistema (3.3) constitui a meia-iteração, através da qual é feita a atualização dos ângulos de fase das tensões das barras, relacionados aos mismatches de potência ativa (meia-iteração ativa). O sistema (3.4) compõe a outra meia-iteração, na qual é feita a atualização das magnitudes das tensões das barras, relacionadas aos mismatches de potência reativa (meia-iteração reativa). Aqui, utilizam-se os valores atualizados dos ângulos de fase, melhorando o desempenho do método. Tem-se, portanto, uma atualização de variáveis de estado a cada meia-iteração.

3.2 ALGORÍTMO BÁSICO PARA A RESOLUÇÃO DOS SUBSISTEMAS 1 E 2 PELO MÉTODO DESACOPLADO

Seja p e q como os contadores das meias-iterações ativa e reativa, respectivamente, e KP e KQ como os indicadores de convergência dos subproblemas ativo e reativo, respectivamente, esses têm a função de sinalizadores (semáforos) computacionais: sempre que alguma variável de estado é alterada, o indicador de convergência do outro subproblema é igualado a “1”, provocando uma avaliação dos mismatches deste outro subproblema, mesmo que já tenha convergido em uma iteração anterior. Com isso, evita-se afastamento do ponto de solução.

SUBSISTEMA 1

1 - Atribuir os valores iniciais: $KP = KQ = 1$, $p = q = 0$. Escolher valores iniciais para as magnitudes (barras PQ) e ângulos de fase (barras PQ e PV) das tensões nodais não fornecidas. Com isso, tem-se o vetor:

$$x = \begin{bmatrix} \theta^0 \\ V^0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

2 - Calcular $P_k(\theta_p, V_q)$ para as barras PQ e PV. Calcular os respectivos mismatches de potência ΔP_k .

3 - Testar a convergência: se

$$\max\{|\Delta P_k|\} \leq \varepsilon_P \text{ para } k=PQ, PV \quad (3.6)$$

Ir para o passo 13; caso contrário ir para o próximo passo.

4. Calcular a matriz H. Calcular os vetores de correções para θ , resolvendo

$$\Delta \theta^p = H(\theta^p, V^q)^{-1} \Delta P(\theta^p, V^q) \quad (3.7)$$

e determinar o novo valor

$$\theta^{p+1} = \theta^p + \Delta \theta^p \quad (3.8)$$

5. Incrementar o contador de meias-iterações ativas ($p \leftarrow p + 1$).

6. Fazer $KQ = 1$.

7. Calcular $Q_k(\theta^p, V^q)$ para as barras PQ. Calcular os respectivos mismatches de potência ΔQ_k .

8. Testar a convergência: se

$$\max\{|\Delta Q_k|\} \leq \varepsilon_Q, \text{ para } k=PQ \quad (3.9)$$

Ir para o passo 13; se não convergiu, ir para o próximo passo

9. Calcular a matriz L. Calcular os vetores de correções para V, resolvendo

$$\Delta V^q = L(\theta^p, V^q)^{-1} \Delta Q(\theta^p, V^q) \quad (3.10)$$

e determinar o novo valor

$$V^{q+1} = V^q + \Delta V^q \quad (3.11)$$

10. Incrementar o contador de meias-iterações reativas ($q \leftarrow q + 1$).

11. Fazer $KP = 1$.
12. Voltar ao passo 2.
13. Fazer $KP = 0$. Testar: se $KQ = 0$, o processo convergiu. Se sim, ir para o passo 15, se não, voltar para o passo 7.
14. Fazer $KQ = 0$. Testar: se $KP = 0$, o processo convergiu. Se sim, ir para o passo 15, se não, voltar para o passo 2.

SUBSISTEMA 2

15. Calcular P_k e Q_k para a barra de referência e Q_k para as barras tipo PV. Calcular fluxos de potência nos elementos da rede e calcular perdas.

Neste algoritmo, os passos 2 a 6 e 13 correspondem à meia-iteração ativa. Os passos 7 a 12 e 14 correspondem à meia-iteração reativa. A resolução do subsistema 2 (passo 15) é igual ao método de Newton-Raphson.

3.3 MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO (NDR)

Baseando-se no método desacoplado, faz-se algumas considerações a fim de se chegar a um método de cálculo mais rápido.

Seja a matriz diagonal de magnitude de tensões, cuja dimensão é definida de acordo com as dimensões de H e L , ou seja:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 & & & \\ & V_2 & 0 & \\ & 0 & . & \\ & & & . \\ & & & & V_{NB} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

De forma que define-se duas novas matrizes, H' e L' , dadas por:

$$H' = V^{-1}H \quad (3.13)$$

$$L' = V^{-1}L \quad (3.14)$$

Os elementos dessas duas matrizes são, portanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} H'_{kk} = -V_k B_{kk} - \frac{Q_k}{V_k} Q_k \\ H'_{km} = V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H'_{mk} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} = -V_k (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \end{array} \right. \quad (3.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L'_{kk} = -B_{kk} + \frac{Q_k}{V_k^2} \\ L'_{km} = G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km} \\ L'_{mk} = -G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Tem-se assim o método desacoplado modificado, definido por:

$$\Delta P / V = H' \Delta \theta \quad (3.17)$$

$$\Delta Q / V = L' \Delta V \quad (3.18)$$

Levando em conta as seguintes considerações:

- θ_{km} é pequeno, de tal forma que $\cos(\theta_{km})$ é muito próximo de 1. Esta aproximação é válida para sistemas de transmissão de Extra Alta Tensão e Ultra Alta Tensão e também para sistemas de distribuição, já que para estes últimos as aberturas angulares são em geral pequenas;
- B_{km} é, em magnitude, muito maior que $G_{km} \sin \theta_{km}$. Para Extra Alta Tensão a relação B_{km}/G_{km} é da ordem de 5, e para de UAT a relação B_{km}/G_{km} pode atingir a ordem de 20.
- $B_{kk} V_h^2$ é, em magnitude, muito maior que Q_k . Isso indica que as reatâncias shunt são, na grande parte dos casos, muito maiores que as reatâncias série (linhas e transformadores);
- As tensões V_k são próximas da unidade (em p.u.).

Aplicando estas aproximações às matrizes H' e L' chega-se a duas novas matrizes, chamadas de B' e B'' , respectivamente:

$$\begin{cases} B'_{kk} = -B_{kk} \\ B'_{km} = -B_{km} \\ B'_{mk} = -B_{km} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \\ B''_{mk} = -B_{km} \end{cases} \quad (3.20)$$

Vê-se aqui um resultado bastante interessante: as matrizes B' e B'' dependem apenas dos parâmetros da rede (impedâncias e susceptâncias dos ramos e elementos shunt), ficando, portanto, independentes das variáveis de estado do sistema (magnitudes e ângulos das tensões nodais). As novas matrizes aproximam-se bastante da matriz susceptância nodal B , com a ressalva de que em B' não constam as linhas e colunas referentes à barra $V\theta$, e em B'' não constam as linhas e colunas referentes às barras $V\theta$ e PV . Essas matrizes são constantes ao longo do processo iterativo (diz-se que o método apresenta "tangente fixa"), diminuindo o tempo computacional e a quantidade de memória antes usada para calcular e inverter H e L a cada iteração. Daí o método ser denominado desacoplado rápido, cujas equações são:

$$\Delta P/V = B' \Delta \theta \quad (3.21)$$

$$\Delta Q/V = B'' \Delta V \quad (3.22)$$

Estas equações passam a substituir os passos 4 e 9 do algoritmo do método desacoplado, apresentado na seção 3.1.1. O restante do algoritmo não é alterado. As matrizes constantes B' e B'' são calculadas logo no passo 1 e apenas uma vez para todo o processo iterativo.

3.4 VERSÕES DO MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO

Com um estudo mais aprofundado do método desacoplado rápido foram propostas e avaliadas 4 (quatro) versões deste método, sendo assim nomeados: versão BB, versão XB, versão BX e versão XX [15, 16].

Resumidamente a diferença entre os quatro métodos está em se usar ou

não os valores das resistências das linhas e se não for utilizada onde desprezar estes valores.

A versão BB não despreza os valores das resistências e se pode dizer que é o método desacoplado rápido propriamente dito.

A versão XB despreza os valores das resistências para a formação da matriz B' , sendo este o método mais utilizado.

A versão BX despreza os valores das resistências para a formação da matriz B'' .

A versão XX despreza os valores das resistências para a formação tanto da matriz B' como da matriz B'' .

4 MÉTODO DE NEWTON RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO COM ROTAÇÃO ÓTIMA DOS EIXOS

4.1 INTRODUÇÃO

As aproximações e simplificações consideradas na elaboração do método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, apresentadas no capítulo anterior, estão associadas, principalmente, as relações entre reatâncias e resistências (r/x) dos elementos da rede. As relações r/x das linhas de transmissão, por sua vez, dependem do tipo de cabo e do nível de tensão do sistema. Quanto mais alto o nível de tensão, maiores são as relações r/x , conseqüentemente, maior é o acoplamento P- θ , Q-V, ou seja, mais adequadas são as referidas aproximações.

Os sistemas de transmissão, onde os níveis de tensão são iguais ou superiores a 230kV, apresentam relações x/r iguais ou superiores a 5, garantindo o bom desempenho dos métodos desacoplados. No entanto, as linhas de transmissão dos alimentadores dos sistemas de distribuição, que envolvem tensões inferiores a 69kV, possuem relações muito baixas, podendo ser inferiores a unidade. Portanto, os métodos desacoplados, na sua forma convencional, não podem ser aplicados a sistemas de distribuição.

A técnica de rotação utilizada nesse trabalho foi proposta em meados da década de 80 [5] e consiste basicamente em mudar o sistema de referência complexo através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possuam relação r/x favorável ao desacoplamento adotado pelo método de fluxo de potência desacoplado rápido.

Neste capítulo a técnica proposta em [5] é apresentada de duas formas, a forma convencional, baseada na idéia de rotação dos eixos complexos, e na forma de uma normalização *por unidade* (p.u.) complexa, baseada na adoção de uma base complexa de potência, o que permite a normalização não apenas do módulo, mas também dos ângulos das impedâncias, possibilitando, assim, a adequação da relação r/x de forma similar à rotação de eixos.

Finalmente, esse capítulo apresenta a metodologia proposta nesse trabalho de um fluxo de potência unificado para redes de transmissão interconectadas a alimentadores de distribuição, através da aplicação da normalização complexa, ou

rotação de eixos, aos elementos dos alimentadores, permitindo a utilização dos métodos de Newton e suas variações desacopladas.

4.2 RELAÇÕES R/X TÍPICAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

As linhas de transmissão dos sistemas de distribuição, ao contrário daquelas presentes em sistemas de transmissão, apresentam, tipicamente, valores de resistência série de ordem equivalente, ou mesmo superiores aos seus valores de reatância série.

A Figura 1 ilustra a representação gráfica de uma impedância série típica de uma linha de transmissão de um sistema de alta tensão. Nesta é possível perceber que o valor da resistência r (Ω ou p.u. Ω) é muito pequeno em relação ao valor da reatância x (Ω ou p.u. Ω). Essas características das redes de alta tensão implicam em um forte acoplamento entre a abertura angular e o fluxo de potência ativa e, também, entre a diferença de potencial e a potência reativa, resultando no conhecido desacoplamento P θ -QV.

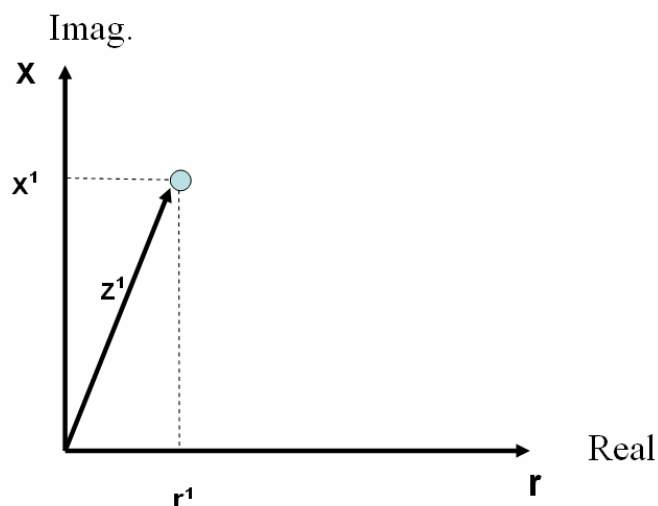


FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA IMPEDÂNCIA TÍPICA DE ALTA TENSÃO

Valores típicos de relação r/x para sistemas de transmissão e distribuição em função do cabo utilizado são apresentados no Quadro 2.

Cabos Utilizados em rede de Transmissão			Cabos Utilizados em rede de Distribuição		
Tipo	Bitola	r/x	Tipo	Bitola	r/x
Cobre	450 MCM a 9000 MCM	0,29 a 0,17	Cobre	6 AWG á 300 MCM	3,13 a 0,33
Alumínio com Alma de Aço	556,5 MCM a 1,75 Pol	0,41 a 0,21	Alumínio sem Alma de Aço	4 AWG á 336,4 MCM	3,2 a 0,51

QUADRO 2 – RELAÇÃO DE R/X POR NÍVEL DE TENSÃO
 FONTE: O Autor

Na Figura 2 está ilustrada graficamente uma impedância série típica de um alimentador de um sistema de distribuição. Neste caso percebe-se que o valor da resistência r (Ω ou p.u. Ω) e da reatância x (Ω ou p.u. Ω) tem proporções equivalentes, impedindo a aplicação das técnicas de desacoplamento adotadas pelos métodos desacoplados.

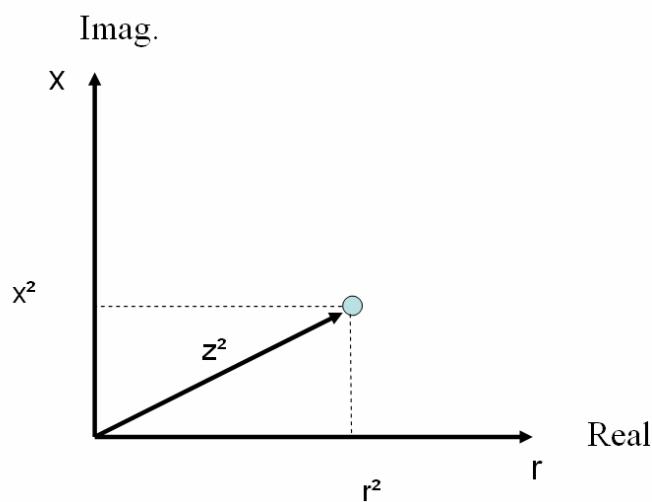


FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE IMPEDÂNCIA DE MÊDIA TENSÃO

4.3 ROTAÇÃO DE EIXOS COMPLEXOS

De acordo com [5-6] uma impedância pode ser representada em outro plano real-imaginário, cujos eixos estejam defasados de um ângulo Φ em relação aos eixos anteriores. A Figura 3 ilustra a rotação de eixos aplicada a uma impedância

típica de rede de distribuição. Nesse novo plano a impedância passa a ser representada pelos componentes r^{rot} e x^{rot} .

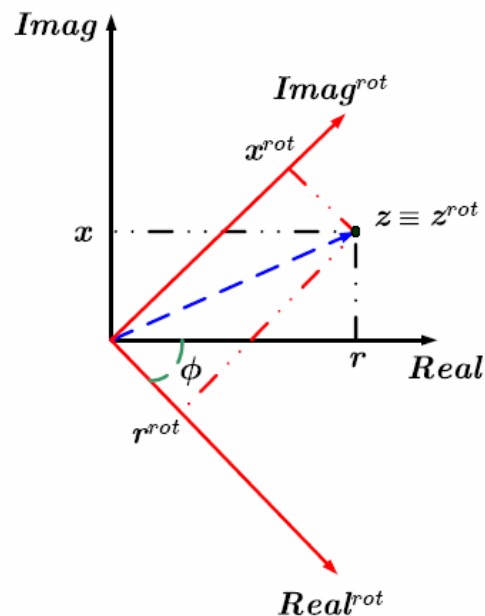


FIGURA 3 – ROTAÇÃO DOS EIXOS DA IMPEDÂNCIA

Sendo assim, verifica-se que esta técnica permite o ajuste dos valores de resistência e reatância série dos elementos da rede, a partir do ângulo de rotação, de forma que esses possam apresentar, por exemplo, as mesmas características das redes de alta tensão, permitindo assim, a aplicação de métodos desacoplados de fluxo de potência.

4.3.1 Representação Matemática do Método

A rotação de eixos ilustrada na Figura 4.3 implica que:

$$\mathbf{Z}^{rot} = \mathbf{Z} \cdot e^{j\Phi} \quad (4.1)$$

Onde \mathbf{Z} é a impedância original do ramo e Φ é o ângulo de rotação.

Assim, os valores rotacionados de resistência e reatância são definidos por

$$r^{rot} = r \cdot \cos \Phi - x \cdot \sin \Phi \quad (4.2)$$

$$x^{rot} = x.\text{sen}\Phi - r.\cos\Phi \quad (4.3)$$

A relação r^{rot}/x^{rot} pode, então, ser expressa por:

$$\frac{r^{rot}}{x^{rot}} = \frac{r.\cos\phi - x.\text{sen}\phi}{x.\text{sen}\phi - r.\cos n\phi} \quad (4.4)$$

Em [4] evidencia-se a possibilidade da utilização da variação do ângulo de rotação, Φ , na obtenção de uma nova relação r^{rot}/x^{rot} , adequada a aplicação do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido.

A rede fictícia obtida com a aplicação do ângulo de rotação definido para todos os ramos da rede requer que as injeções de potência ativa e reativa nas barras sejam igualmente rotacionadas. Esta alteração se faz necessária para que os valores de magnitude e ângulo da tensão em cada barra da rede fictícia sejam os mesmos da rede original, evitando assim a necessidade de aplicação de um processo de “desrotação” aos estados da rede.

As relações entre potência complexa (S), tensão complexa (V), impedância (Z) e corrente (I) podem ser descritas como:

$$S = V \times I^* \quad (4.5)$$

e

$$I = \frac{V}{Z} \quad (4.6)$$

Substituindo-se Z por $Z^{rot}e^{-j\Phi}$, tem-se:

$$I = \frac{V}{Z^{rot} \cdot e^{(-j\phi)}} \quad (4.7)$$

A equação (4.7) mostra que se nas correntes for aplicada uma rotação de mesmo ângulo, mas de sentido oposto à aplicada às impedâncias, as tensões complexas serão as mesmas do sistema original. Assim, para a potência complexa tem-se:

$$S^{rot} = V \cdot (I^{rot})^* \quad (4.8)$$

ou

$$S^{rot} = S.e^{j\phi} \quad (4.9)$$

Conseqüentemente, as injeções de potência ativa e reativa rotacionadas são expressas por:

$$P^{rot} = P. \cos \phi - Q. \sin \phi \quad (4.10)$$

$$Q^{rot} = P. \sin \phi - Q. \cos \phi \quad (4.11)$$

Dessa maneira, aplicando-se a rotação de eixos aos valores especificados de potência ativa e reativa, além das impedâncias séries, o Fluxo de Potência Desacoplado Rápido apresentará bom desempenho e fornecerá o mesmo estado (tensões complexas) da rede original. Após a convergência nas grandezas de interesse, é aplicada a rotação em sentido inverso, obtendo-se então os valores reais da rede.

4.4 MÉTODO DA NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE

Esta seção apresenta uma forma alternativa de interpretar a rotação de eixos descrita na seção anterior, baseada nos conceitos de normalização das grandezas dos sistemas de energia.

A difundida normalização das grandezas elétricas em sistemas de energia, conhecida por normalização por unidade (ou simplesmente *p.u.*), oferece inúmeros benefícios. A idéia básica é estabelecer valores de base para grandezas, tais como tensão, corrente, impedância, potência e definir a grandeza em p.u., como segue:

$$grandezas \text{ por unidade} = \frac{grandezas \text{ real}}{valor \text{ base de grandeza}} \quad (4.12)$$

Tensão, corrente, potência e impedância são grandezas que se relacionam de tal forma que a escolha de valores de base para quaisquer duas delas determina os valores de base para as outras duas. Se forem especificadas as bases para corrente e tensão, poderemos determinar as bases para impedância e potência

aparente. Isto pode se melhor observado através das equações (4.13) e (4.14) abaixo.

$$V = Z.I \quad (4.13)$$

$$S = V.I^* \quad (4.14)$$

Normalmente, devido às necessidades e conveniências, escolhe-se uma base comum de potência (em voltampere), ou seja, S_{base} para todo o sistema e uma base em um nível arbitrário de tensão. Diferentes bases de tensão são especificadas para cada nível de tensão, todos relacionados com a relação de transformação de cada banco de transformador. As bases para as quantidades atuais de impedância e corrente são obtidas a partir das equações (4.13) e (4.14).

A conveniência da representação em p.u. das grandezas em sistemas elétricos de potência é bem conhecida. Normalmente, a tensão e potência de base são valores reais, resultando em valores reais de base de impedância e corrente. Dessa forma, a normalização afeta apenas os módulos das grandezas envolvidas. Nesse trabalho consideramos a possibilidade de adoção de uma base de potência (em VA) complexa, isto é:

$$\dot{S}_{base} = S_{base} \cdot e^{-j\phi_{base}} \quad (4.15)$$

Já as grandezas bases de tensão são definidas da mesma forma que na normalização em *pu* convencional, ou seja, um diferente valor de magnitude é escolhido para cada nível de tensão do sistema de acordo com as relações de transformação, enquanto que o ângulo da tensão de base é nulo. Dessa forma, a base da potência é complexa, enquanto as bases para as tensões são reais, de forma que.

$$\dot{V}_{base} = V_{base} \cdot e^{j0} = V_{base} \quad (4.16)$$

Portanto, a partir de (4.15) e (4.16), podemos concluir que o valor base de impedância Z_{base} será também complexo e definido por:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} e^{-j\phi_{base}} \quad (4.17)$$

$$\dot{Z}_{base} = Z_{base} \cdot e^{-j\phi_{base}}$$

A equação (4.17) implica que a grandeza da impedância na representação *pu* terá uma magnitude normalizada que depende dos valores de base adotados para potência e tensão, assim como na definição convencional por unidade. Além disso, e diferentemente da normalização convencional, os novos valores de impedância em p.u. terão defasagem angular definida pelo ângulo de fase da impedância base (idêntico ao ângulo da potência de base) com sinal contrário, ou seja

$$\dot{Z}_{pu} = R_{pu} + jX_{pu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{Z_{\Omega} \cdot e^{j\phi}}{Z_{base} \cdot e^{j\phi_{base}}} \quad (4.18)$$

$$\dot{Z}_{pu} = Z_{pu} \cdot e^{j(\phi + \phi_{base})}$$

onde Φ_{orig} é o ângulo original da impedância série do elemento.

Conseqüentemente, os valores em p.u. da parte real (resistência) e imaginária (reatância) da impedância são definidos por:

$$R_{pu} = Z_{pu} \cdot \cos(\phi_{ori} + \phi_{base}) \quad (4.19)$$

$$X_{pu} = Z_{pu} \cdot \sin(\phi_{orig} + \phi_{base}) \quad (4.20)$$

Assim, a relação r/x na nova normalização *pu* complexa é dada por :

$$\frac{X_{pu}}{R_{pu}} = \tan(\phi_{orig} + \phi_{base}) \quad (4.21)$$

De forma similar, as injeções de potência ativa e reativa são devidamente normalizadas pela base voltampere complexa, ou seja:

$$\dot{S}_{pu} = P_{pu} + j.Q_{pu} = \frac{S_{VA}}{S_{base}} \quad (4.22)$$

e

$$P_{pu} = S_{pu} \cdot \cos(\phi + \phi_{base}) \quad (4.23)$$

$$Q_{pu} = S_{pu} \cdot \sin(\phi + \phi_{base}) \quad (4.24)$$

As equações (4.19), (4.20), (4.23) e (4.24) mostram que uma nova relação entre o fluxo de potência ativa e potência reativa, bem como entre os valores da reatância e resistência do ramo, é obtida para o sistema normalizado. Portanto, as relações r/x representadas pela equação (4.21) podem ser ajustadas pela definição do ângulo de fase da potência de base ϕ_{base} . Isso significa que os problemas sobre a convergência do método desacoplado rápido para o sistema de distribuição ditada pela baixa r/x podem ser contornados através da adequada escolha /determinação do ângulo ϕ_{base} .

É importante observar que, a solução obtida para os estados a partir da aplicação do cálculo de fluxo de potência para o sistema normalizado com o uso de uma base complexa de potência é exatamente a mesma que a obtida com a base real (p.u. convencional). Isto é esperado, uma vez que as bases de tensão são mantidas reais na nova abordagem.

4.5. EQUIVALÊNCIA ENTRE OS MÉTODOS

Os dois métodos de cálculo para realizar a mudança dos valores de resistência, reatância, das potências ativas e reativas em função do ângulo de rotação do eixo são equivalentes e trazem o mesmo resultado final. Podem ser utilizadas qualquer uma das duas metodologias diretamente sem prejuízo ou necessidade de qualquer alteração nos valores obtidos após a aplicação da rotação.

4.6 CÁLCULO DO ÂNGULO DE BASE OU DE ROTAÇÃO

As duas seções anteriores demonstram que a definição do valor do ângulo de rotação ou ângulo de base é essencial para a aplicação da técnica ao sistema em

estudo. Em [6] os autores propõem a determinação do ângulo a partir do ajuste da relação r/x do sistema, tornando-a adequada aos níveis de transmissão, algo em torno de 3 (três), por exemplo. A desvantagem dessa técnica é a necessidade de verificar se a aplicação do ângulo ao ramo com melhor relação não o torna inadequado ao desempenho dos métodos desacoplados.

Alternativas para determinação do ângulo de rotação foram propostas na literatura. A seguir apresentamos dois métodos para determinação do ângulo.

4.6.1 Ângulo Ótimo Orientado ao Ramo

Como já citado anteriormente, o ângulo de rotação Φ ou de base Φ_{base} precisa ser ajustado às necessidades do sistema. Busca-se, portanto, um valor único e ideal para cada alimentado. Uma opção é realizar uma rotação automática, isto é, o ângulo de rotação conforme descrito na seqüência.

O desacoplamento sobre o qual se baseia o fluxo de carga desacoplado rápido consiste em desconsiderar o efeito dos módulos das tensões nas barras sobre a injeção de potência ativa e o efeito dos ângulos das mesmas na injeção de potência reativa. Assim, para realizar o cálculo do ângulo de rotação utiliza-se um critério que consiste em minimizar os acoplamentos entre P e V e entre Q e θ , ou seja, o ângulo Φ deve fazer com que as submatrizes N e M [8], obtidas após a rotação, tenham valores próximos de zero. Resumindo, o ângulo de rotação deve ser ajustado de forma a atender à hipótese do desacoplamento.

Com esta técnica obtém-se um ângulo de rotação Φ para cada trecho $k-m$, diferentemente de um mesmo ângulo aplicado a toda a rede. Cada equação nodal possui seu respectivo ângulo otimizado.

Inicialmente são calculados os ângulos das impedâncias de cada trecho $k-m$ da rede de distribuição, definido por α_{km} :

$$\text{tg } \alpha_{km} = (x_{km}/r_{km}) \quad (4.25)$$

O segundo passo consiste em determinar o ângulo “ideal” de rotação para cada trecho. Considerando que se pretende determinar a maior relação r/x possível (ou a menor relação r/x), o ângulo de rotação de cada trecho Φ_{km} é determinado por:

$$\Phi_{km} = 90^\circ - \alpha_{km} \quad (4.26)$$

Analisando melhor (4.25) e (4.26) é possível verificar que para cada trecho $k-m$ da rede de distribuição, estamos simplesmente fazendo com que a resistência rotacionada do ramo seja igual a zero ($r_{km}^{rot} = 0$).

Finalmente, um ângulo único para toda a rede é determinado a partir da média aritmética simples de todos os ângulos envolvidos, conforme proposto em [4].

$$\Phi(\text{ótimo}) = (1/N_l) \cdot \sum \Phi_{km} \quad (4.27)$$

onde N_l é o número total de ramos do sistema.

A partir desse ângulo são determinados os valores rotacionados de resistência e reatância de cada ramo, ou seja:

$$r_{km}^{rot} = r_{km} \cdot \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) - x_{km} \cdot \sin(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (4.28)$$

$$x_{km}^{rot} = r_{km} \cdot \sin(\Phi_{\text{ótimo}}) + x_{km} \cdot \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (4.29)$$

Conforme mencionado anteriormente, as potências injetadas ativa e reativa são igualmente rotacionadas para garantir que o estado obtido para a rede fictícia seja o mesmo da rede original. Assim:

$$P_k^{rot} = P_k \cdot \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) - Q_k \cdot \sin(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (4.30)$$

$$Q_k^{rot} = P_k \cdot \sin(\Phi_{\text{ótimo}}) + Q_k \cdot \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (4.31)$$

4.6.2 Ângulo Ótimo Orientado a Barra

Outra forma de cálculo do ângulo seria direcionado a barra [4], que resulta em um processo mais complexo e que, no entanto, não apresenta ganhos significativos quando comparado com o método proposto anteriormente, por isto não foi utilizado para a realização deste trabalho.

Basicamente, a diferença do método do ângulo orientado à barra está em calcular um ângulo ótimo para rotacionar uma barra k de maneira que as considerações de desacoplamento de um ramo $k-m$ sejam mantidas. Mas como este valor de ângulo é orientado a barra, se faz necessário novamente o cálculo para os outros ramos conectados a mesma barra, sendo assim, o ângulo calculado para $k-m$ é diferente do ângulo calculado para $m-k$.

A alternativa encontrada para minimizar a influência do conjunto de ramos ligado á barra k é utilizar o critério dos mínimos quadrados.

Demonstrando de uma maneira matemática teremos que:

$$tg \phi_k = \frac{r_{km}}{x_{km}} \quad (4.32)$$

$$\min \left\{ f_k = \sum_{k \in \Omega k} \left(tg \phi_k - \frac{r_{km}}{x_{km}} \right)^2 \right\} \quad (4.33)$$

$$\frac{df_k}{d\phi_k} = 0 \Rightarrow \sum_{k \in \Omega k} 2 \left(tg \phi_k - \frac{r_{km}}{x_{km}} \right) \frac{dtg \phi_k}{d\phi_k} = 0 \quad (4.34)$$

$$N_k tg \phi_k = \sum_{k \in \Omega k} \left(\frac{r_{km}}{x_{km}} \right) \quad (4.35)$$

$$\phi_k = arctg \left(\frac{1}{N_k} \sum_{k \in \Omega k} \left(\frac{r_{km}}{x_{km}} \right) \right) \quad (4.36)$$

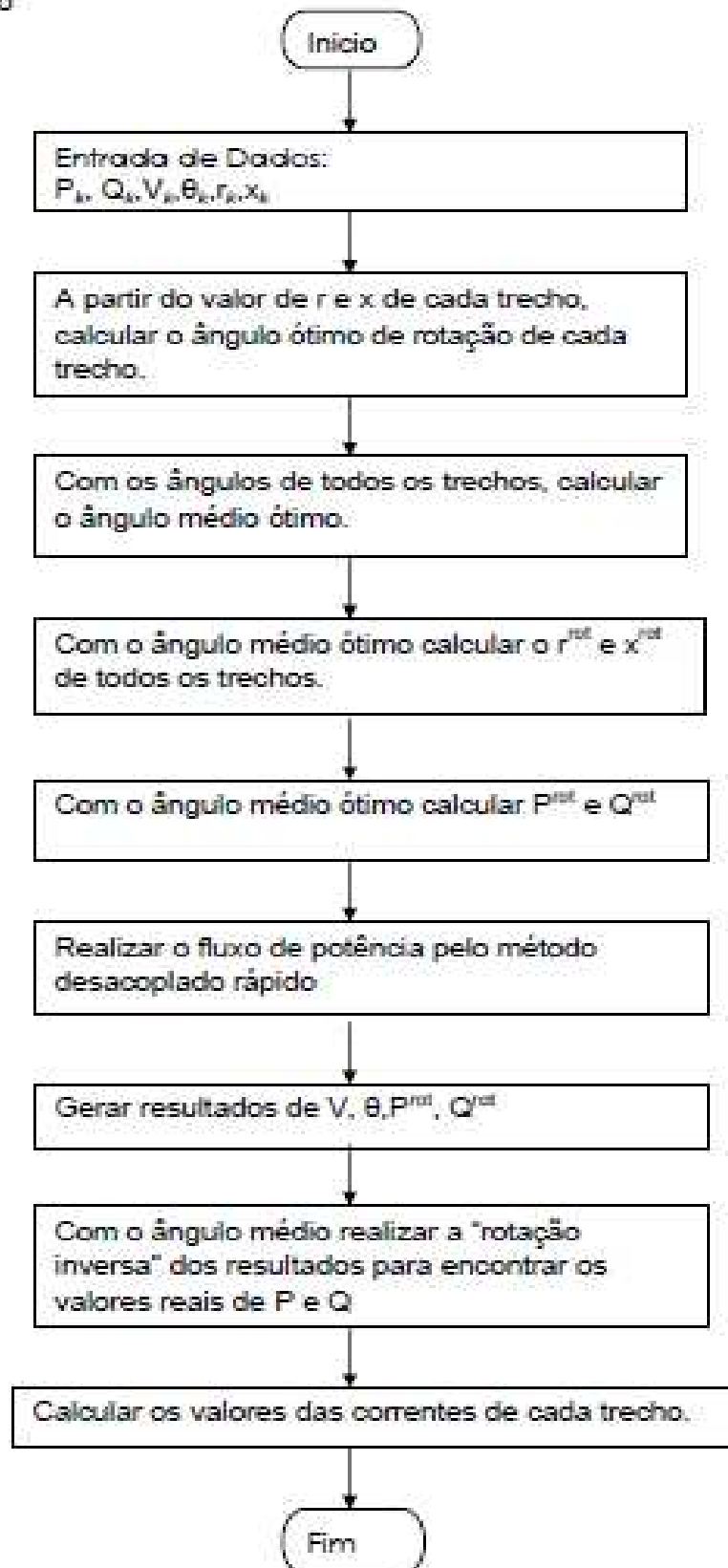
onde N_k é o número de barras conectadas à barra k .

Este método duplica o número de admitâncias da rede e provoca a perda da simetria da matriz admitância nodal, além da rede elétrica perder sua representação física.

Cabe ressaltar que foram realizados alguns testes utilizando a rotação de eixos ou normalização complexa, mas ao invés de se utilizar o Método Desacoplado Rápido foi utilizado o método de Newton-Raphson direto e os testes apresentaram convergência e resultados muito semelhantes aos obtidos com Desacoplado Rápido.

A seguir é mostrado o Fluxograma simplificado para a realização da rotação dos eixos das impedâncias de uma rede de distribuição.

Desacoplado Rápido com Rotação Ótima de Eixos para Circuito Radial de Distribuição



FLUXOGRAMA 1 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO PARA A REALIZAÇÃO DA ROTAÇÃO DOS EIXOS DAS IMPEDÂNCIAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
FONTE: O Autor

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A utilização do método Desacoplado Rápido com Rotação dos Eixos nas redes de distribuição de média tensão apresenta algumas vantagens em relação ao método Backward-Forward, entre elas podemos listar as seguintes:

1 - Permite o fechamento em anel entre alimentadores da mesma subestação ou de subestações distintas;

2 - As configurações dos alimentadores permanecem normais, ou seja, não são destruídas para realizar a simulação;

3 - Permite a locação de geração distribuída de pequeno porte;

4 – É facilmente adaptada para aplicar técnicas de modelagem de chaves em estudos de fluxo de carga [10], simplificando a utilização de paralelismos.

5 – As técnicas de rotação e normalização complexa são equivalentes e podem ser utilizadas sem trazer nenhum prejuízo ou necessidade de alteração na montagem do caso.

Este trabalho explorou, além do fato de unificar os fluxos de potência da alta tensão com a média tensão, as vantagens de permitir o fechamento em anel de alimentadores e a instalação de geração distribuída ao longo da rede.

5 RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Para realizar a análise do desempenho, bem como validar as técnicas propostas nesse trabalho, foram utilizados dois programas computacionais de cálculo de fluxo de potência: um comercial (Anarede) e outro desenvolvido em Matlab. Além desses, um programa exclusivo para sistemas de distribuição radiais (sem fontes de geração distribuída), baseado no método Backward-Forward, foi utilizado como referência para os casos em que sua aplicação é factível. Os resultados obtidos são comparados, possibilitando a conferência, verificação da consistência dos dados e validação da metodologia proposta.

As simulações e resultados envolvem inicialmente três sistemas de distribuição padronizados pelo IEEE: sistemas de 10, 34 e 70 barras [7]. Testes iniciais apresentam os resultados do fluxo de potência para cada sistema isoladamente com o objetivo de verificar a adequação do método desacoplado para sistemas de distribuição a partir da aplicação do algoritmo proposto e de avaliar os resultados obtidos.

Testes adicionais foram realizados considerando a introdução de pequenos geradores de maneira distribuída em algumas barras, para os três sistemas-teste. As simulações foram realizadas com os dois programas computacionais citados anteriormente, permitindo a comparação dos resultados. Estes geradores possuem apenas valores de potência ativa, ou seja, o fator de potência é igual a 1, e potências inferiores a 2MW.

Além dos sistemas-teste padrão do IEEE, simulações e testes foram conduzidos em dois alimentadores reais de uma empresa distribuidora de energia do sul do país. Os resultados obtidos foram comparados com os valores determinados pelo programa de cálculo de fluxo de potência para sistemas de distribuição utilizados pela empresa, o qual é baseado no método Backward-Forward. Também para os alimentadores reais, foram realizados testes com a inclusão de geração distribuída em algumas barras. Como o método disponível na empresa não permite o uso de geração distribuída, as comparações, nesses casos, estão restritas aos dois programas computacionais citados acima.

Este capítulo apresenta ainda resultado de simulações envolvendo paralelismo temporário entre os dois alimentadores reais. Novamente foram

realizadas comparações dos resultados entre os programas computacionais utilizados no desenvolvimento deste trabalho, pois, o programa computacional da empresa, exclusivo para redes de distribuição, não permite trabalhar com casos de paralelismo.

Finalmente, após o término dos testes e validação de resultados com a utilização do método para os casos exclusivos de sistemas de distribuição, segue-se com a apresentação dos resultados da última fase de testes, onde é realizada a unificação do fluxo de potência da alta e da média tensão. Nesse caso foi utilizado o sistema de alta tensão de 14 barras do IEEE ao qual foram acoplados os alimentadores de distribuição de 10 barras, 34 barras e 70 barras. Foram ainda realizadas simulações envolvendo a rede de média tensão da empresa de distribuição do sul do país. Tanto com os sistemas-padrão do IEEE como com as redes reais foram realizadas as variações de inclusão de geração distribuída e, no caso das redes reais, as simulações envolvem ainda situações de paralelismo das redes.

Na seqüência são apresentados e detalhados os resultados dos estudos mencionados acima.

5.2 SISTEMA-TESTE PADRÃO

Como já mencionado anteriormente, foram utilizados três sistemas-teste padrão, de 10, 34 e 70 barras do IEEE. A validação dos resultados foi realizada a partir da comparação dos mesmos com resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Back-Forward Sweep [5] ao sistema original.

5.2.1 Caso de 10 Barras

Neste caso foi utilizado o sistema de distribuição radial de 10 barras do IEEE, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 4, e possui as seguintes características: 1 barra de geração; 9 barras de carga e 9 linhas de distribuição.

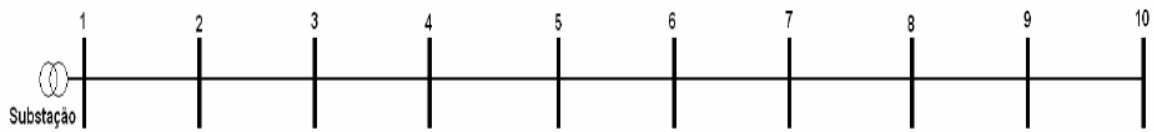


FIGURA. 4 – CASO BASE DE 10 BARRAS

FONTE: O Autor

Na Tabela 1 estão os dados das potências ativas e reativas do caso de 10 barras antes da aplicação da técnica de rotação dos eixos. Na Tabela 2 estão os dados dos valores das resistências, reatância e a relação r/x .

TABELA 1 - VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DO SISTEMA DE 10 BARRAS

Barra	P(W)	Q(Var)
1	-	-
2	1840	460
3	980	370
4	1790	446
5	1598	1840
6	1610	600
7	780	110
8	1150	60
9	980	130
10	1640	200

FONTE: O AUTOR

TABELA 2 - VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X SISTEMA DE 10 BARRAS

DE / PARA	r em pu	x em pu	Relação r/x
1 para 2	0,0233	0,0780	0,29876
2 para 3	0,0026	0,1144	0,02314
3 para 4	0,1411	0,2278	0,61934
4 para 5	0,1320	0,1150	1,14793
5 para 6	0,3749	0,3266	1,14789
6 para 7	0,1711	0,1491	1,14798
7 para 8	0,3885	0,2200	1,76564
8 para 9	0,9065	0,5134	1,76557
9 para 10	1,0101	0,57210	1,76560

FONTE: O Autor

A aplicação do método de rotação ótima de eixos ou, equivalentemente, de normalização complexa, descrito no Capítulo 4 aos dados do sistema da Figura 4 resulta no valor do ângulo ótimo de **42,00°**. Seguindo o algoritmo proposto, este novo ângulo é aplicado ao sistema original gerando a rede fictícia cujos dados são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

TABELA 3 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 10 BARRAS: VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X

DE / PARA	r (rotacionado) em pu	x (rotacionado) em pu	Relação r rot/x rot
para 2	-0,0349	0,0736	-0,4740356
2 para 3	-0,0746	0,0868	-0,8592702
3 para 4	-0,0476	0,2637	-0,1803871
4 para 5	0,0212	0,1738	0,1217728
5 para 6	0,0601	0,4935	0,1217571
6 para 7	0,0274	0,2253	0,1217968
7 para 8	0,1415	0,4235	0,3341544
8 para 9	0,3302	0,9881	0,3341379
9 para 10	0,3679	1,1010	0,3341437

FONTE: O AUTOR

TABELA 4 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 10 BARRAS: VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS

Barra	P(rotacionado) em pu	Q(rotacionado) em pu
2	0,0106	0,0157
3	0,0048	0,0093
4	0,0103	0,0153
5	-0,0004	0,0244
6	0,0080	0,0152
7	0,0051	0,0060
8	0,0081	0,0081
9	0,0064	0,0075
10	0,0108	0,0125

FONTE: O AUTOR

Com estes novos valores de resistências, reatâncias, potências ativas e reativas segue-se ao próximo passo do algoritmo, rodando o fluxo de potência pelo método desacoplado rápido. Conforme mencionado anteriormente, foram utilizados

três programas computacionais, um comercial exclusivo para redes de transmissão (Anarede), outro desenvolvido em Matlab e um comercial para alimentadores de distribuição radiais (Back-Forward). Os resultados de referência são aqueles obtidos com o método Back-Forward, que estão apresentados no Anexo 1. Os detalhes dessa comparação estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

TABELA 5 – SISTEMA DE 10 BARRAS: RESULTADO COM ANAREDE

Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão (pu) Anarede	Ângulo (°) Anarede	Erro da Tensão (%)	Erro do Ângulo (%)
1,0000	0	1	0,0	0,00%	0,00%
0,9929	-0,52	0,9930	-0,5	-0,01%	0,00%
0,9873	-1,27	0,9870	-1,3	0,04%	-2,36%
0,9634	-2,33	0,9630	-2,3	0,04%	1,29%
0,9480	-2,65	0,9480	-2,7	0,00%	-1,89%
0,9171	-3,72	0,9170	-3,7	0,01%	0,54%
0,9071	-4,14	0,9070	-4,1	0,01%	0,97%
0,8890	-4,62	0,8890	-4,6	0,00%	0,43%
0,8587	-5,40	0,8590	-5,4	-0,04%	0,00%
0,8375	-5,99	0,8370	-6,0	0,06%	-0,17%

FONTE: O Autor

TABELA 6 - SISTEMA DE 10 BARRAS: RESULTADOS COM MATLAB

Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão (pu) Matlab	Ângulo (°) Matlab	Erro da Tensão (%)	Erro do Ângulo (%)
1,0000	0	1	0,00	0,00%	0,00%
0,9929	-0,52	0,9929	-0,52	0,00%	0,00%
0,9873	-1,27	0,9873	-1,27	0,00%	0,00%
0,9634	-2,33	0,9634	-2,33	0,00%	0,00%
0,9480	-2,65	0,9480	-2,65	0,00%	0,00%
0,9171	-3,72	0,9172	-3,72	-0,01%	0,00%
0,9071	-4,14	0,9072	-4,13	-0,01%	0,24%
0,8890	-4,62	0,8890	-4,61	0,00%	0,22%
0,8587	-5,40	0,8588	-5,39	-0,01%	0,19%
0,8375	-5,99	0,8376	-5,97	-0,01%	0,33%

FONTE: O Autor

Como um estudo de validação, foi realizado o cálculo de fluxo de potência deste sistema pelo método de Newton-Rapson completo, desconsiderando a rotação

dos eixos, bem como pelo método desacoplado rápido, também sem a rotação dos eixos. Verificou-se que o caso convergiu e que os resultados de tensão e ângulo da barras são idênticos aos valores de tensão e ângulo obtidos com a rotação dos eixos. Estes testes foram realizados tanto no programa comercial como no programa em Matlab e os resultados são apresentados na Tabela 7

TABELA 7 - RESULTADOS PELO ANAREDE E MATLAB SEM ROTAÇÃO DOS EIXOS

Tensão (pu) Anarede	Ângulo (°) Anarede	Tensão (pu) Matlab	Ângulo (°) Matlab
1	0,0	1	0,00
0,9930	-0,5	0,9929	-0,52
0,9870	-1,3	0,9873	-1,27
0,9630	-2,3	0,9634	-2,33
0,9480	-2,7	0,9480	-2,65
0,9170	-3,7	0,9172	-3,72
0,9070	-4,1	0,9072	-4,13
0,8890	-4,6	0,8890	-4,61
0,8590	-5,4	0,8588	-5,39
0,8370	-6,0	0,8376	-5,97

FONTE: O Autor

É possível verificar que os valores de tensão e ângulo das barras são os mesmos, independentes ou não da realização da rotação dos eixos, não importando o método adotado.

5.2.2 Caso de 34 Barras

Este caso considera o sistema de 34 barras do IEEE, ilustrado pelo diagrama unifilar da Figura 5, e possui as seguintes características: 1 barra de geração (SE); 33 barras de carga e 33 linhas de distribuição. Os dados detalhados desse sistema estão apresentados no Anexo 1.

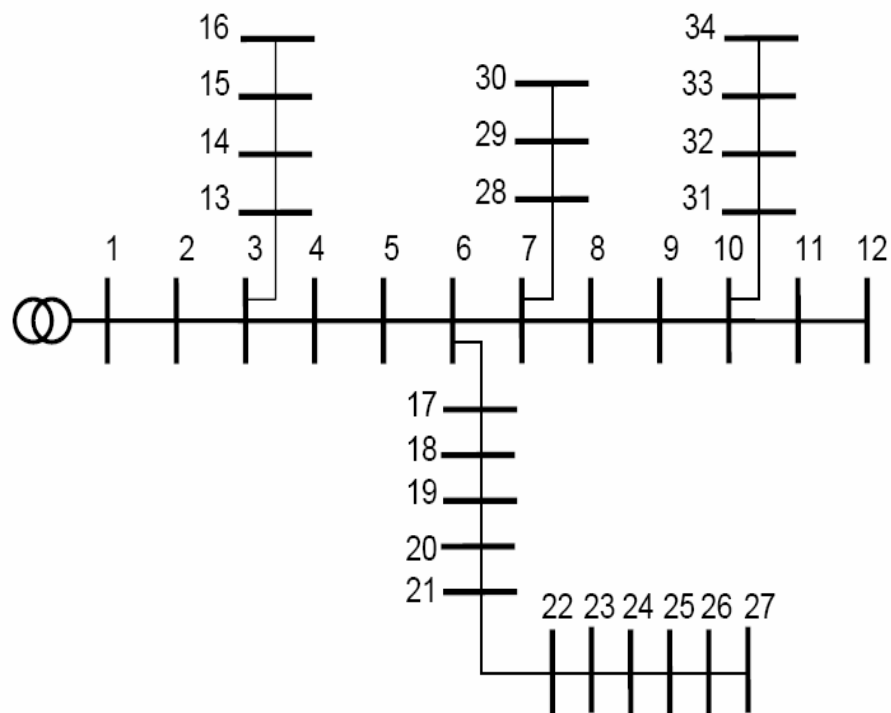


FIGURA 5- CASO BASE DE 34 BARRAS
FONTE: O Autor

O algoritmo proposto foi aplicado ao sistema da Figura 5 resultando no valor do ângulo ótimo de rotação dos eixos de **78,34°**. O referido ângulo foi aplicado na normalização dos parâmetros série e injeções de potência, conforme proposto no Capítulo 4, cujos valores resultantes estão apresentados no Anexo 1.

O passo seguinte do algoritmo compreende o cálculo de fluxo de potência sobre a rede fictícia. Como o caso possui um número significativo de barras, os resultados serão apresentados através de gráficos. O Gráfico 1, indica a comparação dos módulos das tensões de cada barra entre os dois programas utilizados e o resultado de referência realizado pelo método Backward-Forward. Já o Gráfico 2 indica a comparação dos ângulos de cada barra entre os dois programas utilizados e o resultado de referência, que são aqueles obtidos com a aplicação do método Backward-Forward.

Pelos gráficos é possível notar que entre os dois métodos, os valores de tensão obtidos para cada barra são muito semelhantes aos de referência.

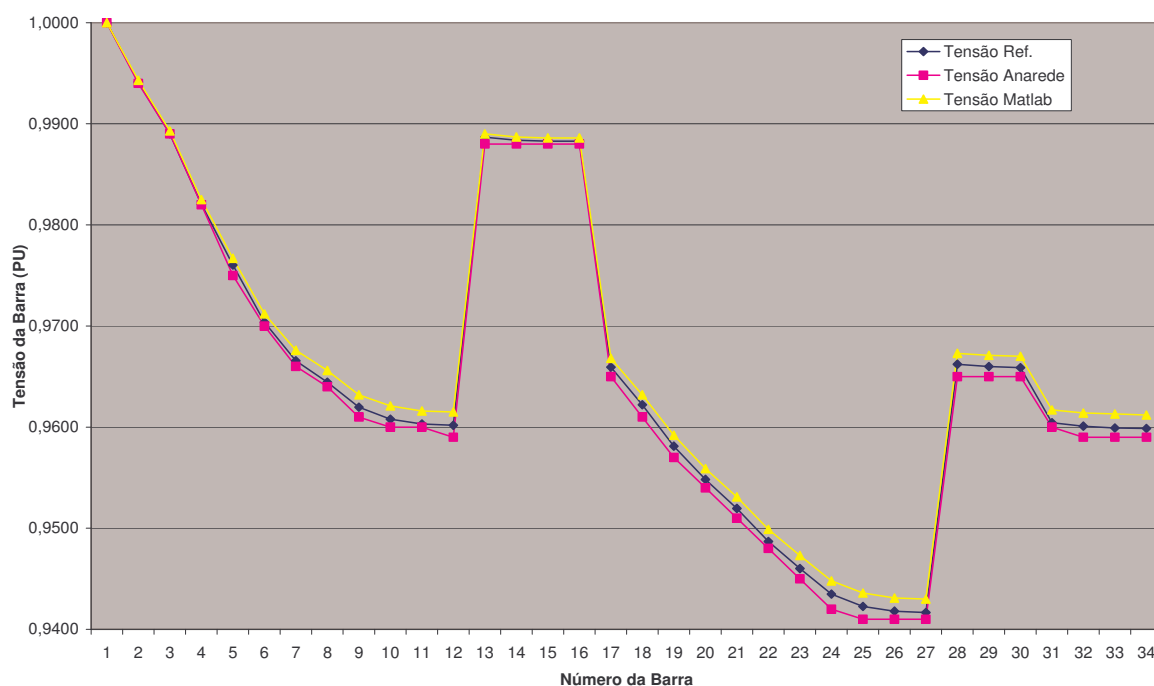


GRÁFICO 1 – PERFIL DO MODO DE TENSÃO (PU)
 FONTE: O Autor

Pelo gráfico é possível perceber que os resultados obtidos utilizando o método FPDR-RE pelos dois programas foram muito semelhantes entre si e comparando com os resultados de referência os valores dos módulos das tensões de cada barra estão praticamente iguais.

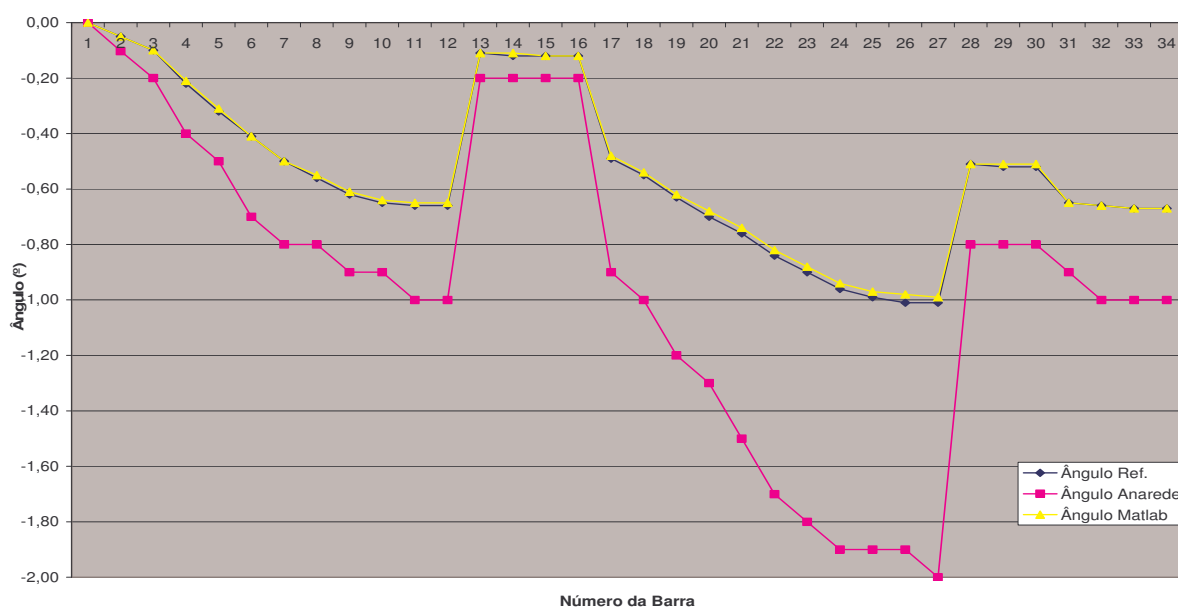


GRÁFICO 2 – PERFIL DO ÂNGULO (°)
 FONTE: O Autor

Pelo gráfico é possível perceber que, de acordo com os resultados obtidos utilizando o método FPDR-RE para os valores do ângulo das barras, o matlab apresenta uma precisão melhor ao ser comparado com os valores de referência e os valores obtidos pelo Anarede estão um pouco mais longe dos valores de referência, mas com uma variação da abertura angular pequena, visto que a variação é de 0° a -2° , o que não traz muitos problemas para o resultado do fluxo como um todo.

Os resultados completos estão apresentados na Tabela 5 do Anexo 1.

No caso base de 34 barras também foi realizado o fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson completo sem a rotação dos eixos, bem como pelo método desacoplado rápido sem a rotação dos eixos, e foi verificado que não ocorreu convergência em nenhum dos casos. Estes testes foram realizados, tanto no programa comercial, como no programa em Matlab, o que evidencia que o método do FPDR-RE é essencial para garantir a convergência para redes de distribuição com características radiais.

Este caso foi testado com a rotação dos eixos e utilizando-se o método de Newton-Raphson, utilizando-se o programa comercial, e foi verificado que com isto ocorreu a convergência e com valores próximos aos de referência. Isto sugere que a rotação dos eixos pode ser utilizada não só no Desacoplado Rápido, mas também pelo método de Newton completo, possibilitando com isto o seu uso em sistemas de distribuição, o que traria um grande ganho para a unificação dos fluxo de potência. Mas isto tudo deverá ser mais bem estudado e detalhado, pois foi realizado apenas um teste de verificação, e este trabalho não tem objetivo de realizar esta comprovação.

5.2.3 Caso de 70 Barras

Considera-se o sistema de 70 barras do IEEE, ilustrado na Figura 6, com as seguintes características: 1 barra de geração (SE), 69 barras de carga e 69 linhas de distribuição. Os dados detalhados desse caso estão indicados no Anexo 1.

A aplicação do algoritmo proposta implica na obtenção de um ângulo ótimo de potência base (ou de rotação) de **56,05°**. A rede normalizada (ou rede fictícia) obtida com a aplicação da normalização p.u. complexa com o referido ângulo está apresentada nas Tabelas 9 e 10 do Anexo 1.

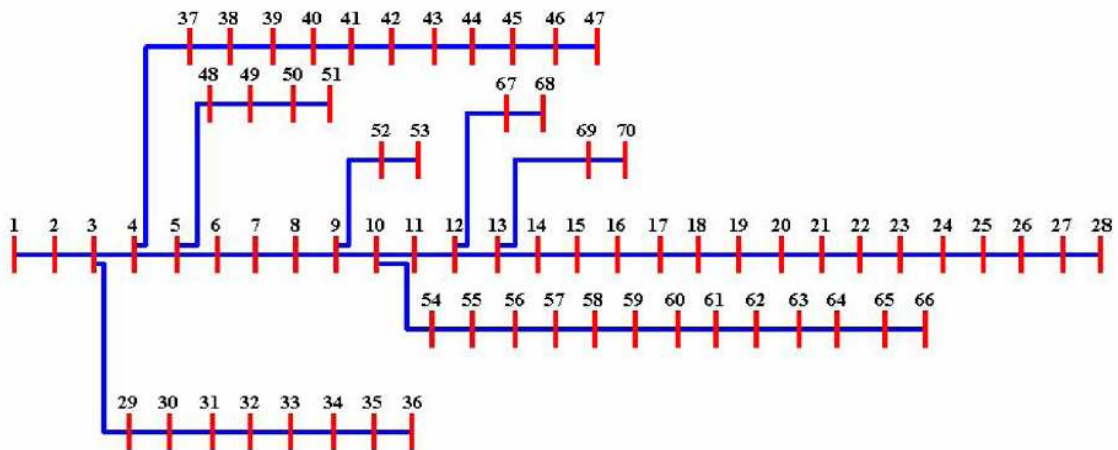


FIGURA 6 – CASO BASE DE 70 BARRAS

Com os valores normalizados de resistências, reatâncias, potência reativa e potência ativa, foi realizado o cálculo do fluxo de potência pelo método desacoplado rápido dos dois programas computacionais (Anarede e Matlab), bem como a comparação com os resultados obtidos com o método Backward-Forward ao sistema original.

Neste caso o programa computacional desenvolvido em Matlab não apresentou convergência, mas isso devido ao fato de que este programa foi desenvolvido sem a intenção de ter uma robustez ou complexidade muito grande, se configurando uma solução mais acadêmica do que funcional. Foram realizadas várias verificações e alterações para que fosse possível ocorrer a convergência, mas não se alcançou um bom resultado. Desta maneira, neste caso só foi possível realizar a comparação dos resultados do caso base com os resultados obtidos pelo programa computacional comercial. Esta comparação é apresentada nos Gráficos 3 e 4 que indicam, respectivamente, os módulos das tensões e os ângulos de cada barra.

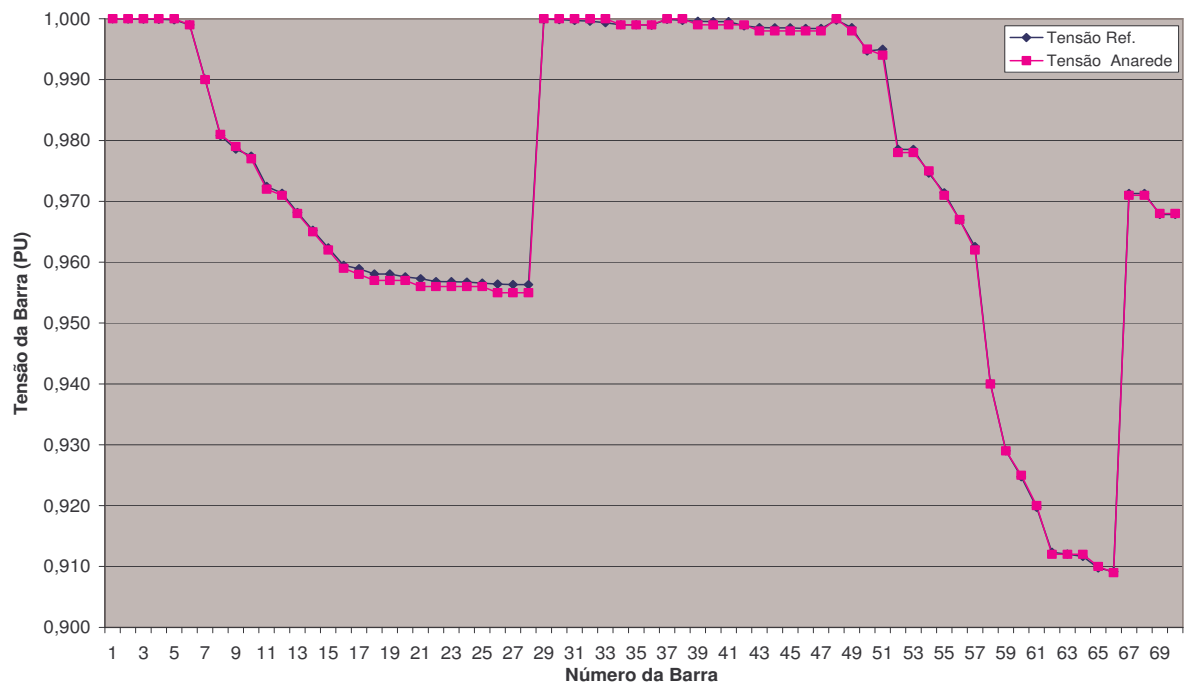


GRÁFICO 3 – PERFIL DO MODO DE TENSÃO (PU)
 FONTE: O Autor

Como nos resultados do sistema de 34 barras, é possível perceber que os valores de tensão obtidos nas barras foram bem semelhantes aos valores de tensão indicados no caso de referência realizado pelo método Backward-Forward.

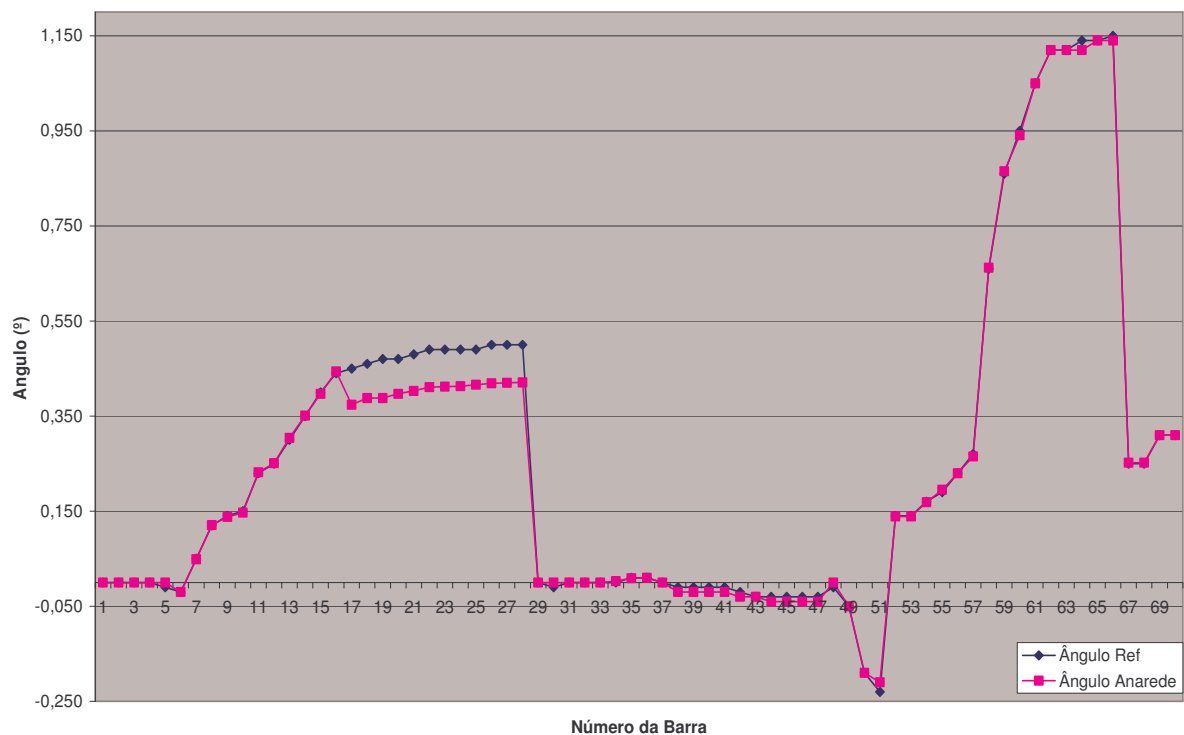


GRÁFICO 4 – PERFIL DO ÂNGULO (°)
 FONTE: O Autor

Para este caso, como a faixa de variação do ângulo foi menor que a do sistema de 34 barras, as variações dos resultados entre a referência e o caso rotacionado foi melhor.

Pode-se ainda, a partir dos resultados detalhados apresentados na Tabela 11 do Anexo 1, observar que, em valores absolutos, os valores dos ângulos não diferem muito entre si.

Neste caso também foi realizado o fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson completo e sem a rotação dos eixos, bem como pelo método desacoplado rápido sem a rotação dos eixos, e foi verificado que não ocorreu convergência em nenhum dos casos. Este teste também foi realizado apenas no programa comercial, visto que o programa em Matlab não apresentou resultados. Mas mesmo assim, novamente, é possível evidenciar que o método do FPDR-RE realmente promove a convergência para redes de distribuição com características radiais.

Cabe observar também que para este caso foi realizado o teste com os dados do caso rotacionado, utilizando-se o método de Newton-Raphson, e novamente foi verificado a convergência com resultados semelhantes aos indicados como referência, mas como já citado não é objetivo deste trabalho realizar a análise desta situação.

O Quadro 3 indica resumidamente o comportamento de cada sistema com a aplicação ou não da rotação, se ocorreu convergência, e a comparação dos resultados entre os métodos apresentados.

Caso	Rotação	Anarede	Matlab	Comparação de Resultados
10 Barra	Sem Rotação	Converge	Converge	iguais
10 Barra	Com Rotação	Converge	Converge	iguais
34 Barra	Sem Rotação	Não converge	Não converge	Não se aplica
34 Barra	Com Rotação	Converge	Converge	Arredondamento
70 Barra	Sem Rotação	Não converge	Não converge	Não se aplica
70 Barra	Com Rotação	Converge	Não converge	Arredondamento

QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS 3 SISTEMAS TESTE DO IEEE

FONTE: O Autor

5.2.4 Casos Bases com Inclusão de Geração Distribuída

Com a efetivação do método após a comparação dos resultados obtidos com os casos bases, realizou-se a avaliação do impacto da inclusão de geração e verificou-se o comportamento das tensões e ângulos das barras, bem como os seus efeitos sobre os sentidos dos fluxos de potências ativas e reativas.

Todas as barras nas quais foram incluídas as unidades de geração distribuída foram tratadas como barras do tipo PQ, já que se trata de unidades de pequeno porte com fator de potência unitário. Este tratamento atende o perfil atual de geração distribuída que esta solicitando conexão na rede de média tensão, ou seja, unidades de pequeno porte, com aproveitamento hidráulico de pequenas quedas d'água ou bio-massa, que podem atingir algo na ordem de 2MW e que podem ser ligadas diretamente na rede de média tensão ou até mesmo na de baixa tensão, como vem acontecendo mais recentemente. Isto faz com que a metodologia do cálculo do fluxo de potência seja revista e inclui novas variáveis no estudo, sendo que em alguns casos é necessário a realização de estudos especiais e com utilização de parâmetros sem uma definição muito exata.

Foram realizados diversos testes com diferentes valores de GD instalados ao longo das barras das 3 redes de distribuição. Assim, para compactar os resultados, optou-se por apresentar apenas o comportamento dos sistemas-testes e não os valores obtidos. A validação de cada caso se fez através da comparação dos resultados apurados entre os dois programas computacionais, menos no caso de 70 barras, pelas razões já expostas acima.

O Quadro 4 indica resumidamente o comportamento de cada sistema teste com a inclusão da geração distribuída.

Sistema	Convergência	Valores de Tensões, Ângulos	Valor dos Fluxos de Potência Ativa e Potência Reativa
10 Barras	Convergiu para o programa comercial	Melhoria nos níveis de Tensão. Comparação indicou igualdade entre os resultados dos valores de tensão e dos valores de ângulos.	Comparação indicou igualdade entre os resultados dos valores da potência ativa e reativa.
	Convergiu para o programa em MATLAB		
34 Barras	Convergiu para o programa comercial	Melhoria nos níveis de Tensão. Comparação indicou igualdade entre os resultados dos valores de tensão e dos valores de ângulos.	Comparação indicou igualdade entre os resultados dos valores da potência ativa e reativa.
	Convergiu para o programa em MATLAB		
70 Barras	Convergiu para o programa comercial	Melhoria nos níveis de Tensão. Não foi possível realizar a comparação devido a não convergência do programa em MATLAB.	Não foi possível realizar a comparação devido a não convergência do programa em MATLAB.
	Não convergiu para o programa em MATLAB.		

QUADRO 4 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FONTE: O Autor

5.3 ALIMENTADORES REAIS

Esta seção apresenta os resultados referentes a dois alimentadores reais de uma concessionária de distribuição do sul do país. Estes alimentadores estão representados de maneira simplificada com o condensamento das cargas, exatamente da mesma forma que são representados pelo cadastro elétrico da empresa.

A Figura 7 indica a configuração simplificada dos alimentadores 1 e 2. O Quadro 5 indica os valores de resistência, reatância, potência ativa e potência reativa antes da rotação e após a aplicação da rotação de cada alimentador. O valor

do ângulo de rotação (ou de base) para cada alimentador está igualmente indicado na referida tabela.

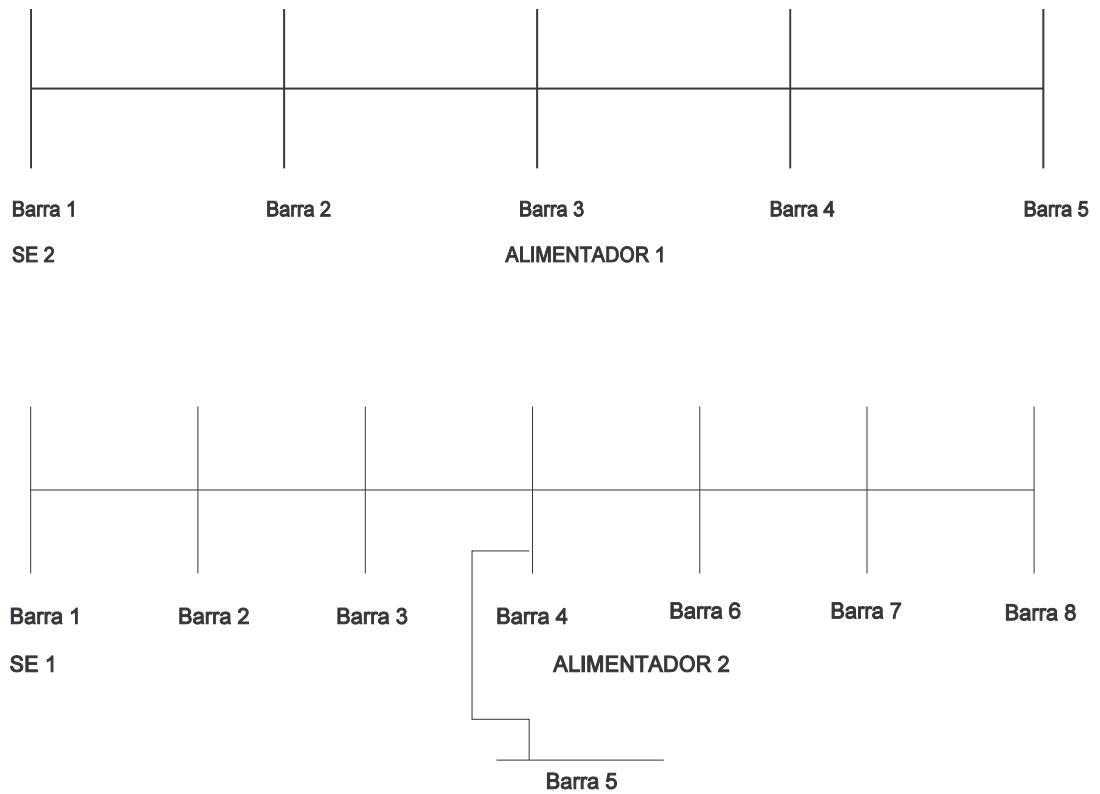


FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO DOS ALIMENTADORES 1 E 2 DO CASO REAL
FONTE: O Autor

Alimentador 1 Ângulo de Rotação 48,41º				
DE / PARA	r (ohms pu)	x (ohms pu)	r rot (ohms pu)	x rot (ohms pu)
Barra 01 para Barra 02	0,3317	0,3738	-0,0595	0,4962
Barra 02 para Barra 03	0,3888	0,4382	-0,0697	0,5817
Barra 03 para Barra 04	0,4054	0,4569	-0,0727	0,6065
Barra 04 para Barra 05	0,0590	0,0665	-0,0106	0,0882
Potências	P (Kw)	Q (KVAR)	Prot (Kw)	Qrot (KVAR)
Barra 2	410	198	124,02	438,09
Barra 3	2587	1252	780,56	2766,01
Barra 4	958	463	289,52	1023,87

Barra 5	330	198	70,93	378,25
---------	-----	-----	-------	--------

Alimentador 2 Ângulo de Rotação 44,35°				
DE / PARA	r (ohms pu)	x (ohms pu)	r rot (ohms pu)	x rot (ohms pu)
Barra 01 para Barra 02	0,2764	0,3115	-0,0201	0,4160
Barra 02 para Barra 03	0,1143	0,1288	-0,0083	0,1719
Barra 03 para Barra 04	0,0332	0,0374	-0,0024	0,0499
Barra 04 para Barra 05	0,2281	0,0829	0,1051	0,2187
Barra 04 para Barra 06	0,1474	0,1661	-0,0107	0,2219
Barra 06 para Barra 07	0,1290	0,1454	-0,0094	0,1941
Barra 07 para Barra 08	0,2027	0,2285	-0,0148	0,3051
Potências	P (Kw)	Q (KVAr)	Prot (Kw)	Qrot (KVAr)
Barra 2	0,00	0,00	0,00	0,00
Barra 3	565	273	213,16	590,18
Barra 4	0	0	0,00	0,00
Barra 5	850	411	320,47	888,10
Barra 6	0	0	0,00	0,00
Barra 7	2357	1141	887,73	2463,59
Barra 8	1000	484	376,70	1045,16

QUADRO 5 - DADOS DOS ALIMENTADORES 1 E 2 ANTES E APÓS A ROTAÇÃO DOS EIXOS
FONTE: O Autor

Os resultados obtidos com a aplicação do método FPDR-RE para estes alimentadores foram comparados com os gerados pelo programa computacional utilizado pela empresa de distribuição que é baseado na metodologia Backward-Forward.

O Quadro 6 apresenta os resultados dessa comparação no que diz respeito às tensões complexas nas barras. A tabela não apresenta o valor do ângulo da tensão das barras para o método Backward-Forward, pois o programa computacional da empresa não indica este parâmetro.

Alimentador 1				
Numero Barra	Tensão(pu) e Ângulo(º) Método FPDR-RE - Anarede	Tensão (pu) Método Backward-Forward	Tensão(pu) e Ângulo(º) Método FPDR-RE - Matlab	
Barra 1 (Se 2)	1,000 0,0º		1,000 0,00º	
Barra 2	0.996 -0.1	0.995	0.996 -0.09	

Barra 3	0,971 -0,7	0,975	0,971 -0,68
Barra 4	0,962 -0,9	0,959	0,963 -0,90
Barra 5	0,960 -0,9 ^o	0,957	0,961 -0,93 ^o
Alimentador 2			
Numero Barra	Tensão(pu) e Ângulo(°) Método FPDR-RE - Anarede	Tensão (pu) Método Backward-Forward	Tensão(pu) e Ângulo(°) Método FPDR-RE - Matlab
Barra 1 (Se 1)	1,000 0,0 ^o	1,000	1,000 0,0 ^o
Barra 2	0,979 -0,5 ^o	0,979	0,979 -0,50 ^o
Barra 3	0,970 -0,7	0,973	0,970 -0,70
Barra 4	0,967 -0,8	0,970	0,967 -0,77
Barra 5	0,965 -0,7	0,968	0,965 -0,75
Barra 6	0,959 -1,0	0,961	0,959 -0,95
Barra 7	0,952 -1,1	0,953	0,951 -1,12
Barra 8	0,949 -1,2	0,951	0,949 -1,20

QUADRO 6 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS
FONTE: O Autor

Os resultados, apresentados no quadro acima, evidenciam a eficácia do método também para sistemas reais.

Os resultados apresentados na seqüência buscam a validação da metodologia proposta para situações de paralelismo entre os dois alimentadores. É importante ressaltar que o programa computacional disponível na concessionária não pode ser aplicado enquanto que os programas exclusivos para redes de alta tensão (Anarede) não são adequados considerando os valores originais do sistema. As tensões de cada barra e os fluxos de potência ativa e reativa são monitorados considerando essa configuração. Estas informações são as mais importantes para verificar a possibilidade ou não de se realizar o paralelismo temporário entre alimentadores reais de distribuição.

Como já informado na introdução, as redes de distribuição operam normalmente de forma radial, com o fluxo de potência na direção única da fonte (subestação) para a carga. Mas sob certas circunstâncias é possível realizar uma mudança temporária na configuração da rede, possibilitando que ocorra o paralelismo entre duas fontes independentes ou não. Este paralelismo nada mais é que o fechamento em anel das redes de distribuição que deixam de operar de forma radial. Esta configuração tem uma série de complicações de ordem de proteção, o que faz com que seja necessário que a configuração em anel seja adotada durante o menor espaço de tempo possível.

O estudo destes casos deve ser realizado de uma maneira muito detalhada

levando em consideração inclusive as cargas para horário específico do paralelismo e as condições de tensões da subestação fonte; inclusive este estudo só é válido para o dia e o horário estudado. Uma dificuldade muito grande para a realização deste estudo é justamente a falta de uma ferramenta apropriada, pois, como já mencionado, o método Backward-Forward não realiza este tipo de configuração e se faz necessário o uso do Anarede para contagem de caso e ao se utilizar os valores originais de resistências e reatâncias dos cabos da rede de distribuição pode ocorrer de o caso não convergir ou até mesmo uma avaliação errada do estudo devido a precisão do programa.

A Figura 8 indica, de maneira sucinta, a configuração de duas redes de distribuição radial normal e a configuração com a execução do paralelismo temporário nestas duas redes.

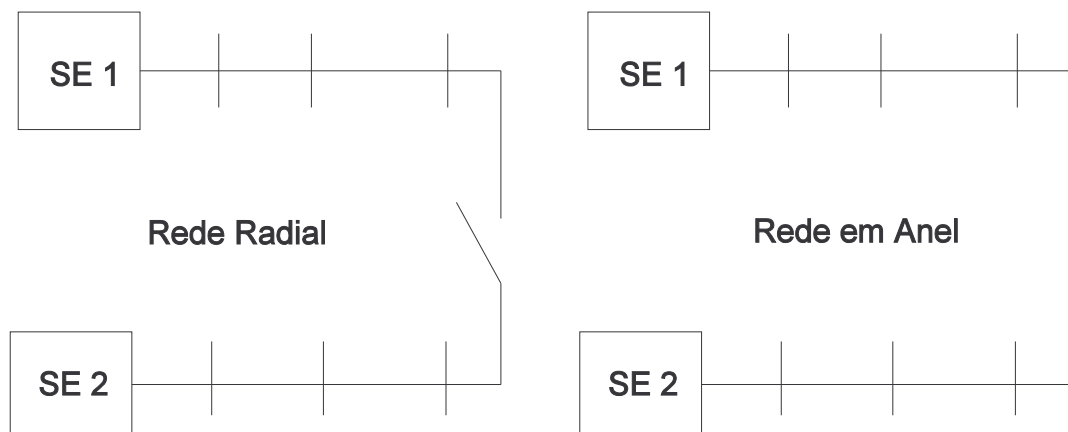


FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO DE DUAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL EM PARALELO
FONTE: O Autor

Para a realização da simulação do paralelismo foram incluídas duas novas barras no sistema para simular a chave onde é realizada a interligação dos alimentadores, ficando com a configuração indicada na Figura 9.

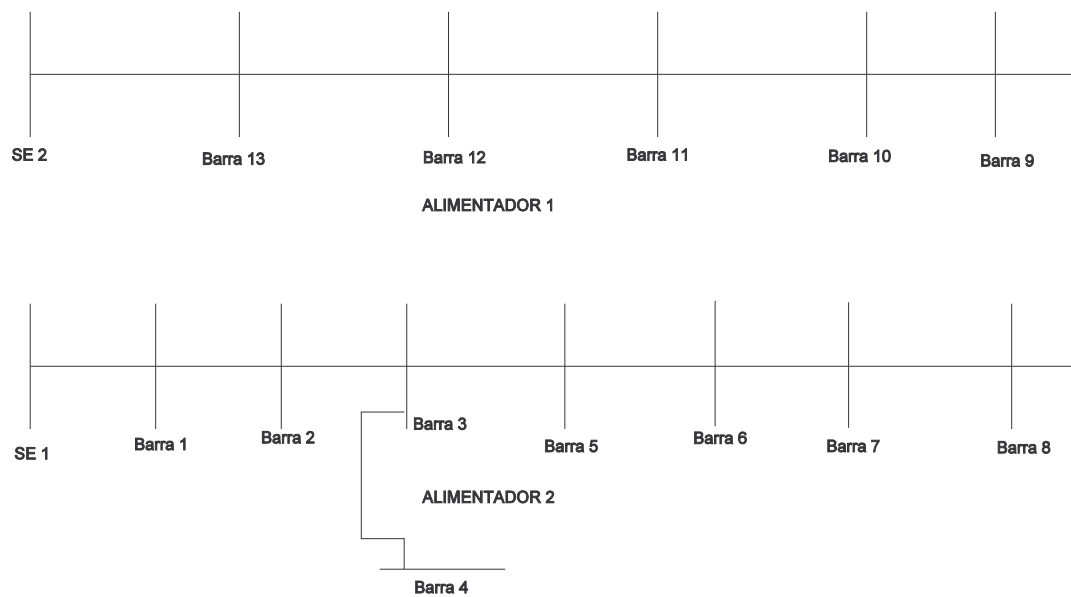


FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO COM PARALELISMO
FONTE: O Autor

As barras 8 e 9 são as indicações da inclusão da chave na configuração das redes para possibilitar a execução do fechamento em anel da rede de distribuição e o trecho de rede entre estas chaves é incluído na simulação como a resistência e reatância de um trecho muito pequeno de cabo, algo em torno de 100 metros de cabo. Na prática, para permitir o fechamento do paralelismo dos dois alimentadores, a chave deve ser do tipo tripolar e que permita abertura e fechamento sob carga.

Como o paralelismo muda a configuração da rede e se fez necessário um novo cálculo do ângulo de rotação, pois, como já mencionado, é utilizado um único ângulo para toda a rede de distribuição. A nova rede irá assumir os valores apresentados na Tabela 8. Certamente é possível prever os alimentadores que podem operar em paralelismo e adotar um ângulo único em ambas as situações, com e sem paralelismo, evitando a necessidade de uso de ângulos distintos em cada caso.

TABELA 8 - DADOS DOS ALIMENTADORES 1 E 2 LIGADOS EM PARALELOS

Paralelismo Alimentador 1 e 2 - Ângulo de Rotação 46,38°				
DE / PARA	r (ohms pu)	x (ohms pu)	r rot (ohms pu)	x rot (ohms pu)
Se 1 Barra 1	0,2764	0,3115	-0,0349	0,4150
Barra 1- Barra 2	0,1143	0,1288	-0,0144	0,1715
Barra 2- Barra 3	0,0332	0,0374	-0,0042	0,0498
Barra 3- Barra 4	0,2281	0,0829	0,0973	0,2223
Barra 3- Barra 5	0,1474	0,1661	-0,0186	0,2214
Barra 5- Barra 6	0,1290	0,1454	-0,0163	0,1937
Barra 6- Barra 7	0,2027	0,2285	-0,0256	0,3044
Barra 7- Barra 8	0,0037	0,0042	-0,0005	0,0055
Barra 8- Barra 9	0,0037	0,0042	-0,0005	0,0055
Barra 9- Barra 10	0,0037	0,0042	-0,0005	0,0055
Barra 10- Barra 11	0,3317	0,3738	-0,0418	0,4980
Barra 11- Barra 12	0,3888	0,4382	-0,0490	0,5838
Barra 12- Barra 13	0,4054	0,4569	-0,0511	0,6087
Barra 13- Se 2	0,0590	0,0665	-0,0074	0,0885

Potências	P (Kw)	Q (KVar)	Prot (Kw)	Qrot (KVar)
Barra 1	0	0	0,00	0,00
Barra 2	565	273	192,10	597,37
Barra 3	0	0	0,00	0,00
Barra 4	850	411	288,79	898,90
Barra 5	0	0	0,00	0,00
Barra 6	2357	1141	799,83	2493,51
Barra 7	1000	484	339,41	1057,86
Barra 8	0	0	0,00	0,00
Barra 9	0	0	0,00	0,00
Barra 10	330	198	84,29	375,50
Barra 11	958	463	325,64	1012,96
Barra 12	2587	1252	878,13	2736,60
Barra 13	410	198	139,48	433,42

FONTE: O Autor

Com estes dados foi realizada a simulação para verificação das tensões das barras e o sentido dos fluxos das potências ativa e reativa, tanto no programa computacional comercial como no programa realizado em Matlab, e os resultados obtidos foram semelhantes. O que valida o método proposto.

Devido às características das manobras e do tempo de duração para a realização de um paralelismo momentâneo, fica muito difícil a realização de

medições para a comprovação prática dos valores indicados nas simulações.

Para a liberação de paralelismo entre dois alimentadores, não importando se estão ligados na mesma subestação-fonte ou em subestações-fontes diferentes, é necessário atender aos critérios de tensão e ângulo, antes da mudança de configuração, durante o paralelismo e depois do paralelismo com a nova configuração dos alimentadores. O critério de tensão seria que nenhuma barra que compõem a barra do sistema de distribuição fique abaixo de um valor já pré-estabelecido, de tal forma que não irá provocar problemas aos consumidores ligados nos alimentadores. O critério do ângulo da tensão seria que não fosse provocada uma variação brusca no ângulo de tensão dos alimentadores no exato momento do paralelismo e que seja realizada a conexão de alimentadores sem grandes defasamentos angulares.

Serão mostrados a seguir, na Tabela 9, os valores das tensões e ângulos de cada barra gerados pelos dois programas computacionais, pois como já indicado, esses são os principais parâmetros para permitir a liberação da conexão em paralelo entre dois alimentadores.

TABELA 9– TENSÕES NAS BARRAS DURANTE O PARALELISMO

Numero Barra	Tensão(pu) e Ângulo(°) Programa Comercial		Tensão(pu) e Ângulo (°) MATLAB	
Se 1	1,000	0,0	1,000	0,000
Barra 1	0,980	-0,5	0,980	-0,462
Barra 2	0,972	-0,7	0,972	-0,657
Barra 3	0,970	-0,7	0,969	-0,707
Barra 4	0,967	-0,7	0,967	-0,695
Barra 5	0,963	-0,9	0,963	-0,881
Barra 6	0,956	-1,0	0,956	-1,035
Barra 7	0,954	-1,1	0,954	-1,089
Barra 8	0,954	-1,1	0,954	-1,088
Barra 9	0,954	-1,1	0,954	-1,089
Barra 10	0,954	-1,1	0,954	-1,088
Barra 11	0,958	-1,0	0,958	-1,013
Barra 12	0,968	-0,7	0,968	-0,734
Barra 13	0,996	-0,1	0,996	-0,099
Se 2	1,000	0,0	1,000	0,000

FONTE: O Autor

5.4 CASO UNIFICADO

Finalmente, essa seção apresenta os resultados de simulações que permitem verificar a possibilidade da unificação do fluxo de redes com características de transmissão juntamente com seus alimentadores com características de distribuição, utilizando-se de um único método e de uma única ferramenta computacional.

Para isto foi utilizada a seguinte metodologia:

A - Foi escolhido o caso IEEE de 14 barras de um sistema de transmissão [6]; cujos dados estão indicados no Anexo 2;

B - Foi escolhida a barra de número 9 para acoplamento da rede de distribuição que compreende o sistema de 10 barras do IEEE com os valores já rotacionados.

C - Foi realizada a subtração das potências ativas e reativas da barra 9 do valor total das potências ativas e reativas referentes aos casos conectados a esta barra. A escolha desta barra se deu devido ao fato de ser a que tem a maior carga de potência ativa e reativa e não traria nenhum impacto as mudanças necessárias para a montagem dos casos.

D – Se fez necessário a inclusão de um transformador rebaixador, como acontece na prática, para abaixar a tensão do nível de Transmissão para o nível de Distribuição. Isto foi realizado através da inclusão de dois ramos e uma barra, onde a impedância destes dois ramos seriam as impedâncias primária e secundária do transformador e a barra seria uma barra do tipo PQ sem carga.

E – Também se fez necessária a modificação da barra de referência do caso isolado original para uma barra do tipo PQ, que neste caso representaria a barra da subestação onde estão conectados todos os alimentadores de distribuição. A rotação dos eixos começaria a partir desta barra e não se deve incluir nenhuma carga nesta barra, ou seja, para o estudo de um alimentador deve-se desprezar as cargas dos outros alimentadores que não fazem parte do estudo. Isto devido à diferença de injeções de potências rotacionadas e não rotacionadas nesta barra. No entanto é perfeitamente possível incluir mais de um alimentador conectado para barra que simula a barra de saída da subestação e cada alimentador com um ângulo de rotação independente, pois este parâmetro só depende das características do alimentador. O ângulo só se torna único quando da conexão em anel de dois

alimentadores.

O primeiro teste foi realizado com o sistema de distribuição de 10 barras acoplado ao sistema de transmissão de 14 barras.

Sendo assim o caso base de 14 barras ficou com a configuração mostrada na Figura 10.

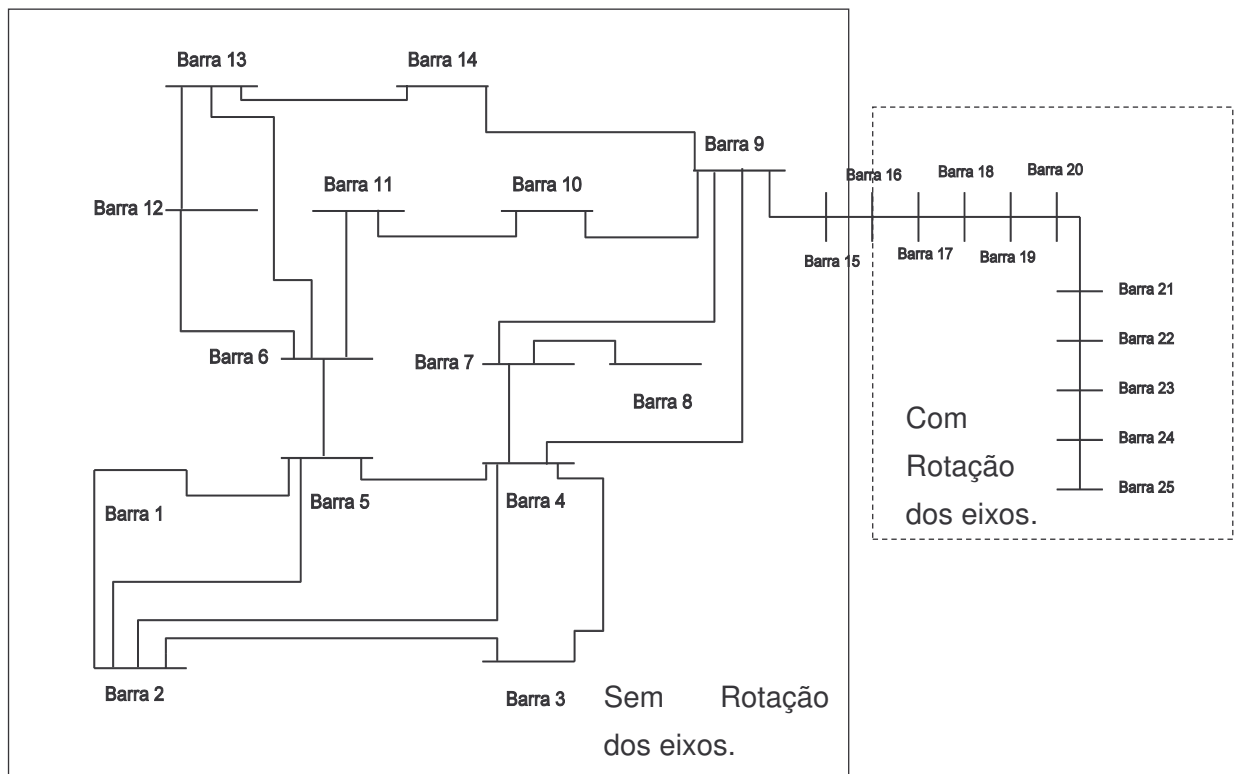


FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO SISTEMA UNIFICADO DE 14 BARRAS COM SISTEMA DE 10 BARRAS
FONTE: O Autor

Para um melhor entendimento da configuração iremos realizar alguns comentários:

- 1- Nas barras que compõem a parte do caso referida a alta tensão não ocorre rotação dos eixos, ou seja, é aplicado o método de Newton Desacoplado Rápido diretamente;
- 2- Na inclusão do transformador rebaixador é necessário indicar, na simulação, a impedância do primário (trecho entre as barras 9-15) e a impedância do secundário (trecho entre as barras 15 e 16), neste caso, como o caso base não indicava estes valores, foram utilizados os valores práticos;

- 3- A barra de número 16 seria a representação do barramento de onde saem todos os alimentadores da subestação, mas para uso do método FPDR-RE é necessário realizar a exclusão desta carga e considerar apenas o alimentador em estudo.
- 4- A rotação de eixos é aplicada a partir da primeira barra 16, inclusive. Mas com esta barra não deve ter carga, na prática a rotação se inicia no trecho entre a barra 16 e 17.
- 5- Quando da inclusão de fontes de geração distribuída em algumas barras, sempre foram utilizados valores tais que não permitissem que ocorressem injeções de potência ativa ou reativa, partindo da rede de distribuição para a rede de transmissão.

Para um melhor entendimento de como foi realizado o acoplamento do caso o Quadro 7 indica como foram consideradas as cargas da barra número 9.

Barra 9 Original		Barra 9 Rotacionada	
Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
29,5	16,6	23,11	5,21

QUADRO 7 POTÊNCIA DA BARRA 9
FONTE: O Autor

Após estas alterações no caso base, foi verificado que o caso convergiu para valores muito próximos daqueles resultados de tensão e fluxo de potência de todas as barras e linhas do sistema de alta tensão e com os resultados obtidos na rede radial, conforme indicado na simulação, se a mesma fosse tratada de maneira isolada.

Esta simulação foi realizada nos dois programas computacionais e os resultados foram semelhantes.

Os Gráficos 5 e 6 indicam os perfis dos módulos das tensões e do ângulo de cada barra desta configuração.

A Tabela 13 do Anexo 1 apresenta os resultados das tensões e ângulos obtidos com as simulações, que resultaram nos gráficos abaixo.

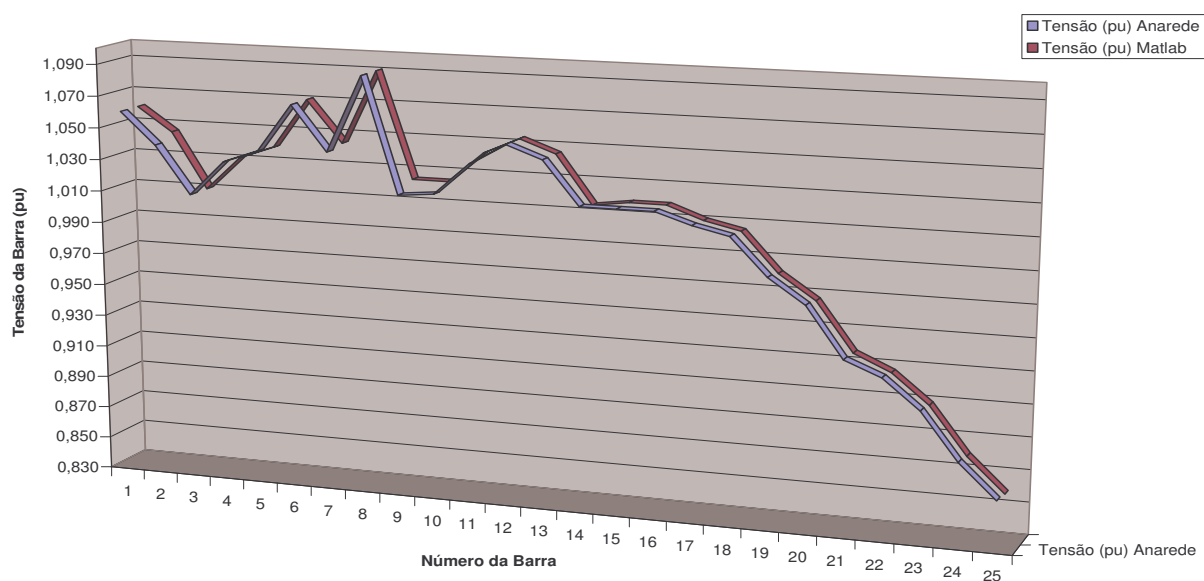


GRÁFICO 5 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Pelo gráfico é possível notar que os resultados dos módulos das tensões nas barras foram extremamente semelhantes ao se realizar a comparação dos valores entre os resultados obtidos pelos dois programas.

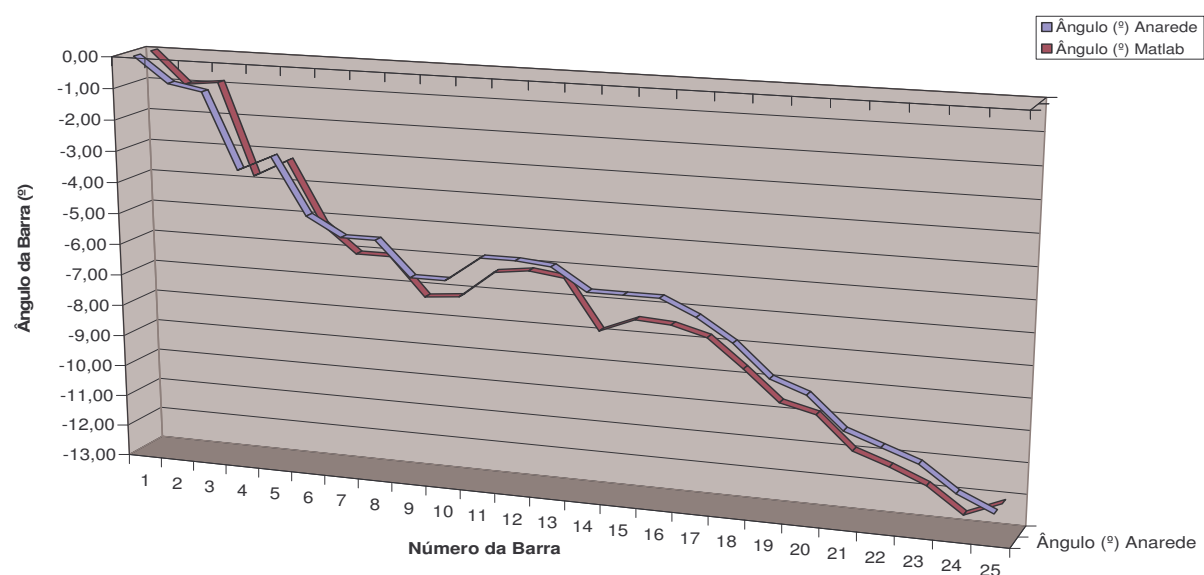


GRÁFICO 6 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Pelo gráfico é possível notar que, ao se realizar a comparação dos resultados obtidos pelos dois programas, os valores dos ângulos das tensões nas barras foram muito próximos e com comportamento de variação muito semelhantes.

Com este resultado favorável, foi realizada a inclusão de geração distribuída à rede radial e foi possível verificar novamente a convergência do caso. Também foi possível observar que os resultados obtidos dos módulos de tensão e ângulos das barras, da rede radial, foram idênticos se a mesma fosse tratada de maneira isolada, ou seja, sem estar acoplada ao sistema de alta tensão. Observando novamente que se tomou o cuidado de não utilizar valores de potências de geração distribuídas que provocassem a injeção de potências ativas e reativas ao sistema de alta tensão.

Novamente, como foram realizados vários testes com a inclusão de geração distribuída, não estamos indicando os valores obtidos de todos os casos. Ao invés disso, será exemplificado a partir de um dos casos simulados. A geração distribuída foi instalada na barra de número 25 com o valor de 2MW e fator de potência unitário, gerando os resultados apresentados nos Gráficos 7 e 8.

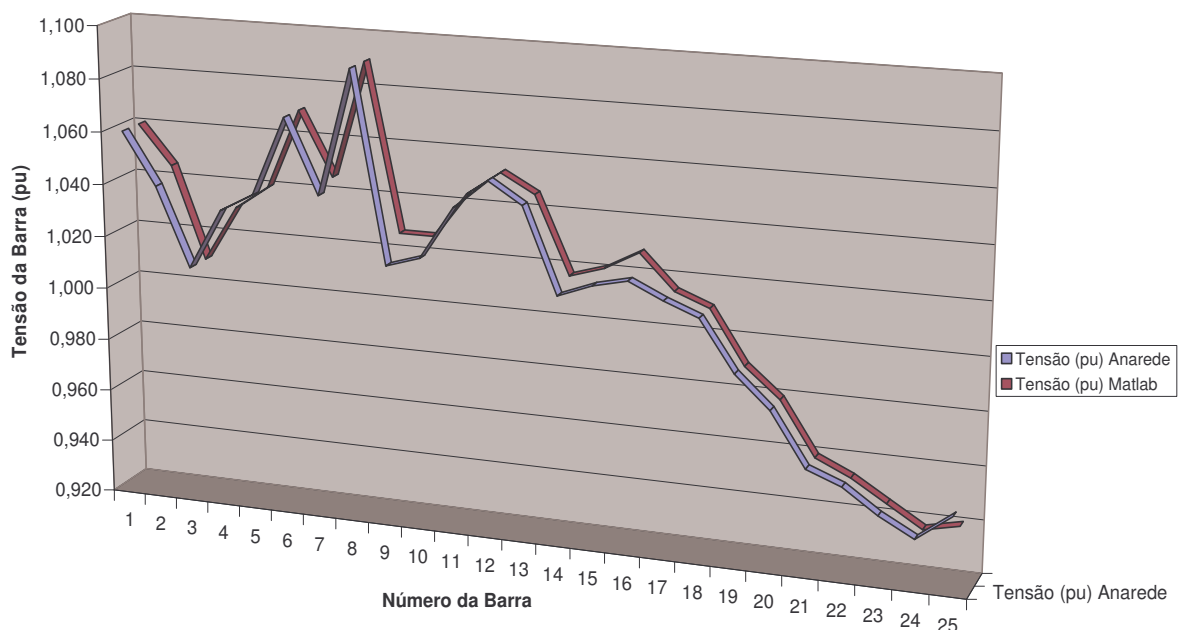


GRÁFICO 7 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA BARRA 25- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Novamente é possível perceber que os valores dos módulos das tensões nas barras se mantiveram semelhantes na comparação dos dois programas e é possível notar também a melhora da tensão na barra de numero 25 com a inclusão da geração distribuída.

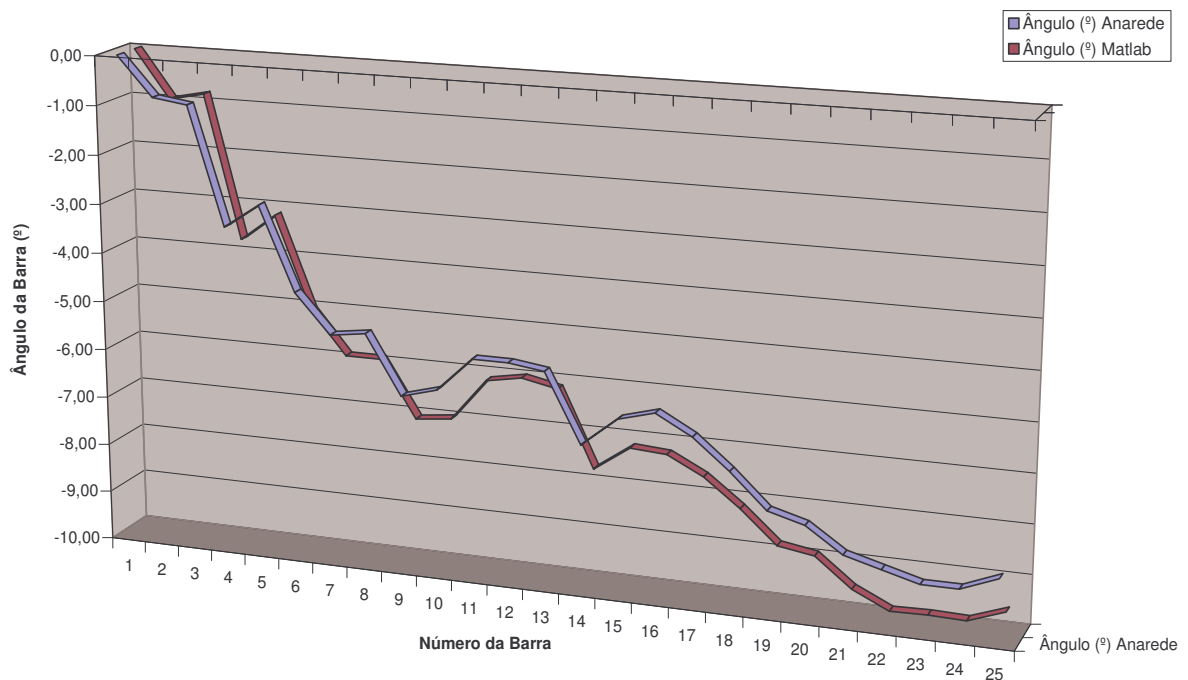


GRÁFICO 8 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS ACRESCIDO DO CASO DE 10 BARRAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA BARRA 25- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Mais uma vez é possível perceber que os valores dos ângulos das tensões nas barras se mantiveram semelhantes na comparação dos dois programas, validando assim a utilização deste método para o estudo do caso unificado com a geração distribuída.

Com esta validação fomos para o próximo passo que foi a realização de simulações envolvendo a inclusão dos dois alimentadores reais na barra 9, com e sem o paralelismo temporário. Novamente o caso convergiu com os resultados dos módulos das tensões e ângulos, obtidos na rede radial, idênticos se a mesma fosse tratada de maneira isolada.

A configuração do caso de 14 Barras mais o caso real dos dois alimentadores é apresentada na Figura 11.

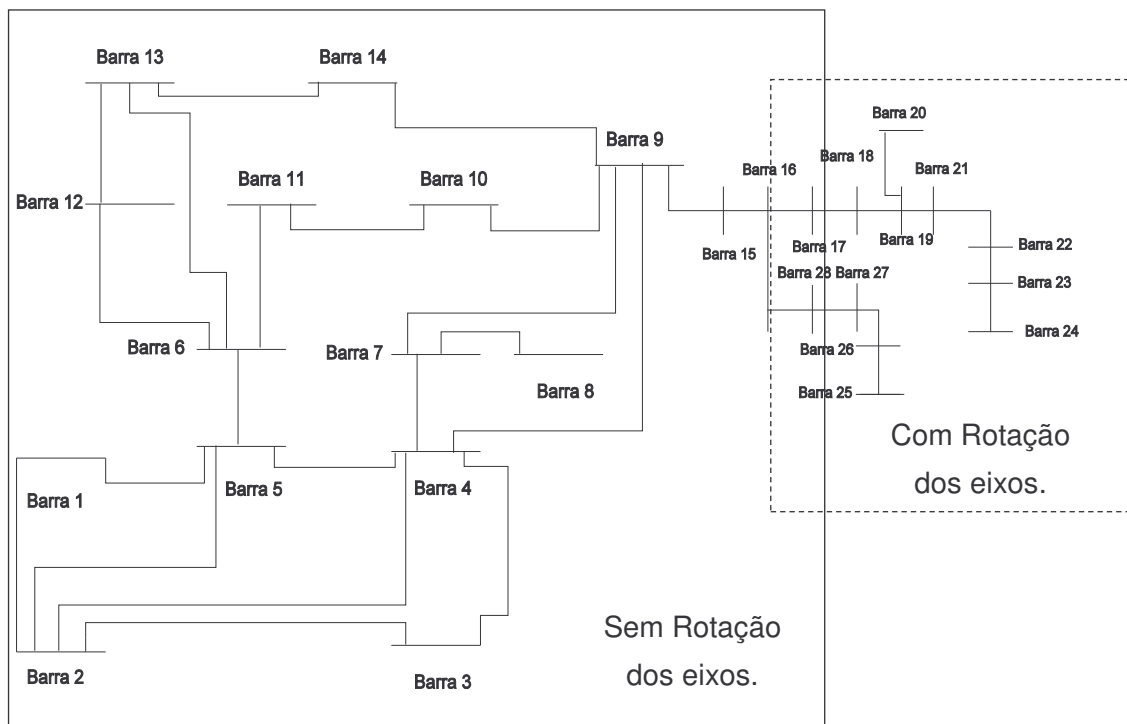


FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL DOS DOIS ALIMENTADORES
 FONTE: O Autor

Neste caso também, para um melhor entendimento da configuração, iremos realizar alguns comentários:

- 1- Nas barras que compõem a parte do caso referida a alta tensão não ocorre rotação dos eixos, ou seja, é aplicado o método de Newton Desacoplado Rápido diretamente;
- 2- Na inclusão do transformador rebaixador é necessário indicar, na simulação, a impedância do primário (trecho entre as barras 9-15) e a impedância do secundário (trecho entre as barras 15 e 16), neste caso, como o caso base não indicava estes valores, foram utilizados dos valores práticos;
- 3- A barra de número 16 seria a representação do barramento de onde saem todos os alimentadores da subestação, mas para uso do método FPDR-RE é necessário realizar a exclusão desta carga e considerar apenas os dois alimentadores em estudo.
- 4- A rotação de eixos é aplicada a partir da primeira barra 16, inclusive. Mas como esta barra não deve ter carga, na prática a rotação se inicia no

trecho entre a barra 16 - 17 e 16 -28.

- 5- Novamente, quando da inclusão de fontes de geração distribuída em algumas barras, sempre foram utilizados valores tais que não permitissem que ocorressem injeções de potência ativa ou reativa, partindo da rede de distribuição para a rede de transmissão. Pois ao se efetuar a rotação dos eixos, os valores das potências também devem ser rotacionados, conforme já informado, e incluí-los desta maneira na parte da rede que não sofreu rotação, traria valores errados da estimação de valores das potências, tensões e ângulos das barras.

O Gráfico 9 indica a comparação dos resultados entre os programas Anarede e Matlab dos módulos de tensão de todas as barras deste caso e o Gráfico 10 indica a comparação dos resultados entre os programas Anarede e Matlab dos ângulos das barras. A tabela com os resultados desta configuração é apresentada no Anexo 1, na tabela 14.

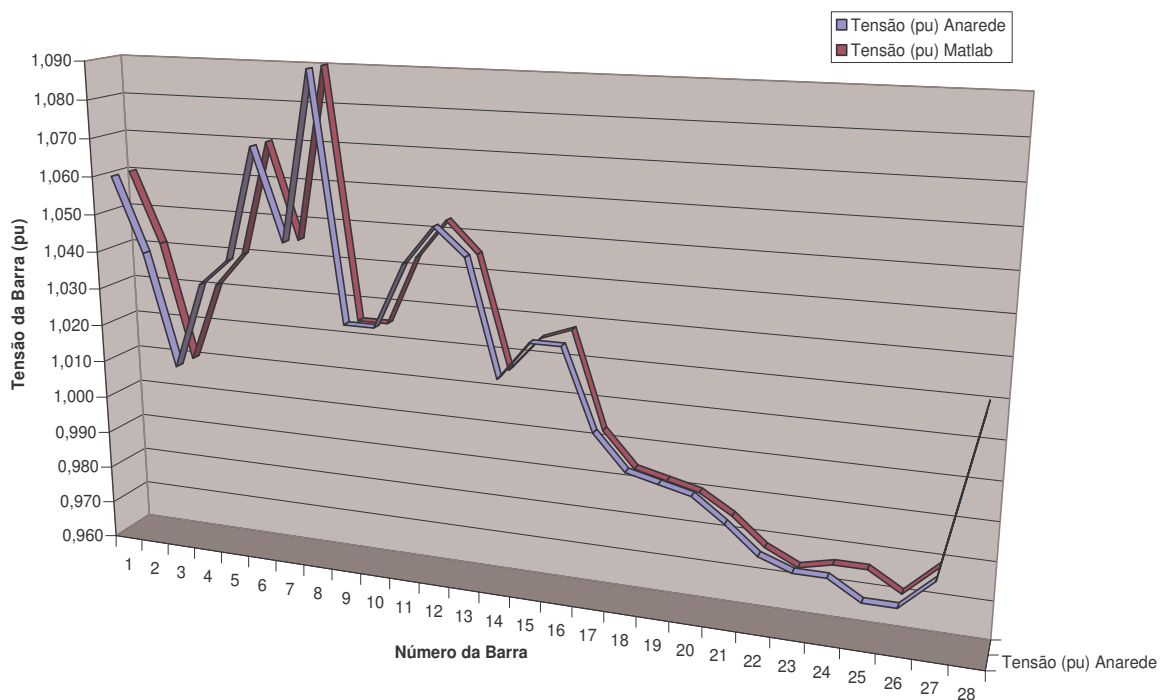


GRÁFICO 9 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Assim como no sistema onde foi adicionado um único alimentador de 10 barras e foi possível verificar a semelhança entre os valores dos módulos de tensão das barras, também neste caso com dois alimentadores com ângulos de rotação diferente é possível verificar a eficiência do método.

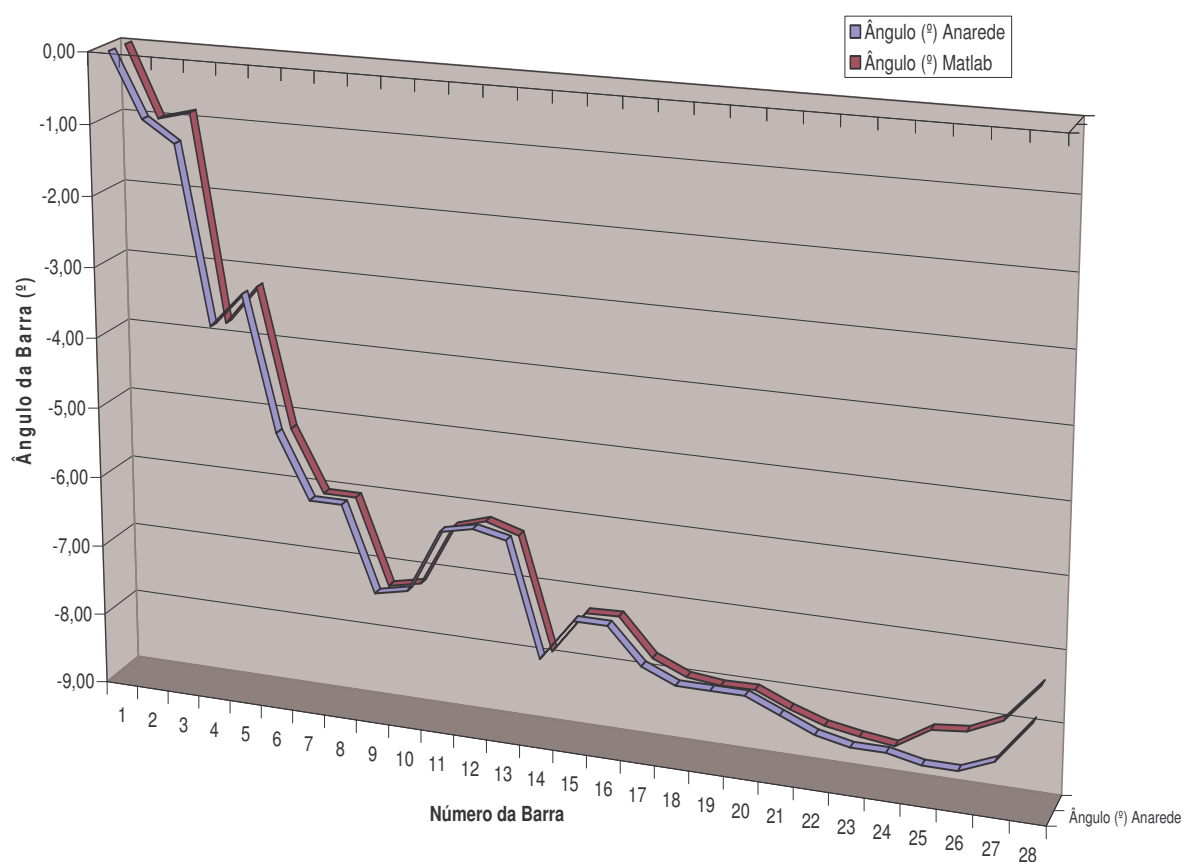


GRÁFICO 10 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

A comparação dos valores obtidos dos ângulos das tensões também reforça a validação do caso quando da utilização de dois alimentadores.

A configuração do caso de 14 Barras mais o caso real dos dois alimentadores em paralelo é apresentado na Figura 12.

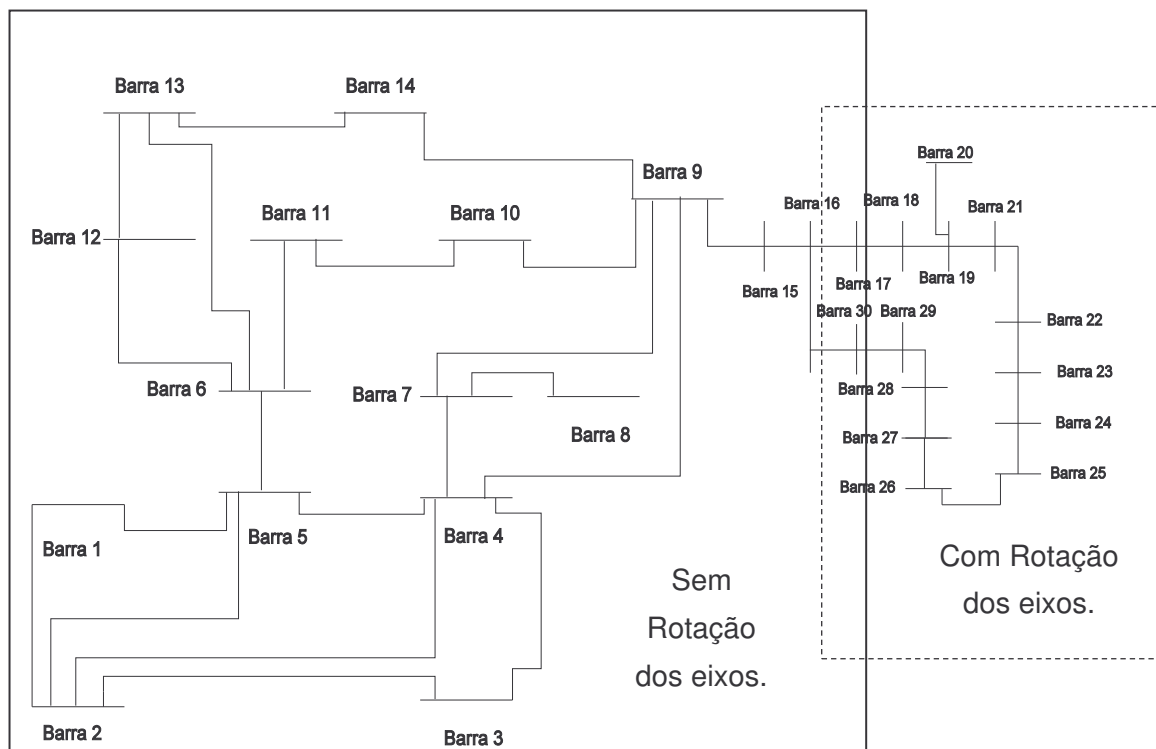


FIGURA 12 - CONFIGURAÇÃO DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL DOS DOIS ALIMENTADORES EM PARALELO
FONTE: O Autor

Neste caso também são válidos todos os comentários realizados nos dois casos anteriores, apenas atualizando a numeração das barras onde se inicia a rotação dos eixos (barras 16 - 17 e 16 -30)

O Gráfico 11 indica a comparação dos resultados entre os programas Anarede e Matlab dos módulos de tensão de todas as barras deste caso e o Gráfico 12 indica a comparação dos resultados entre os programas Anarede e Matlab dos ângulos das barras. A tabela com os resultados desta configuração é apresentada no anexo 2, na tabela 16.

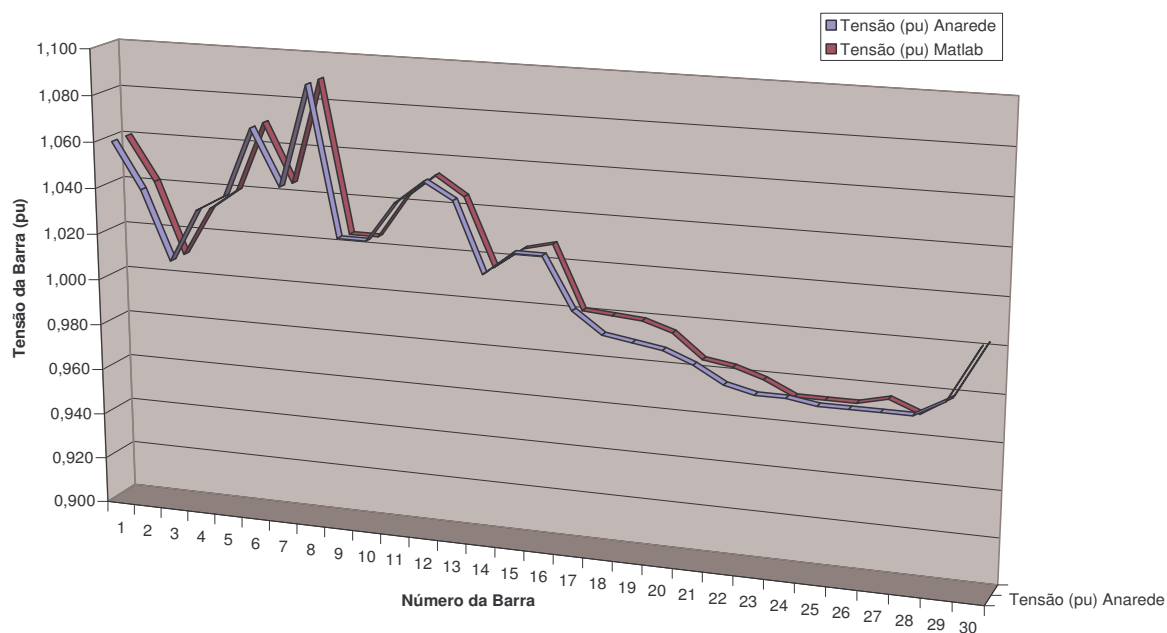


GRÁFICO 11 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL EM PARALELO - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Com a execução do fechamento em anel dos dois alimentadores não ocorreu alteração na semelhança dos resultados dos dois programas computacionais, sendo assim, temos mais um indicativo da validação do caso.

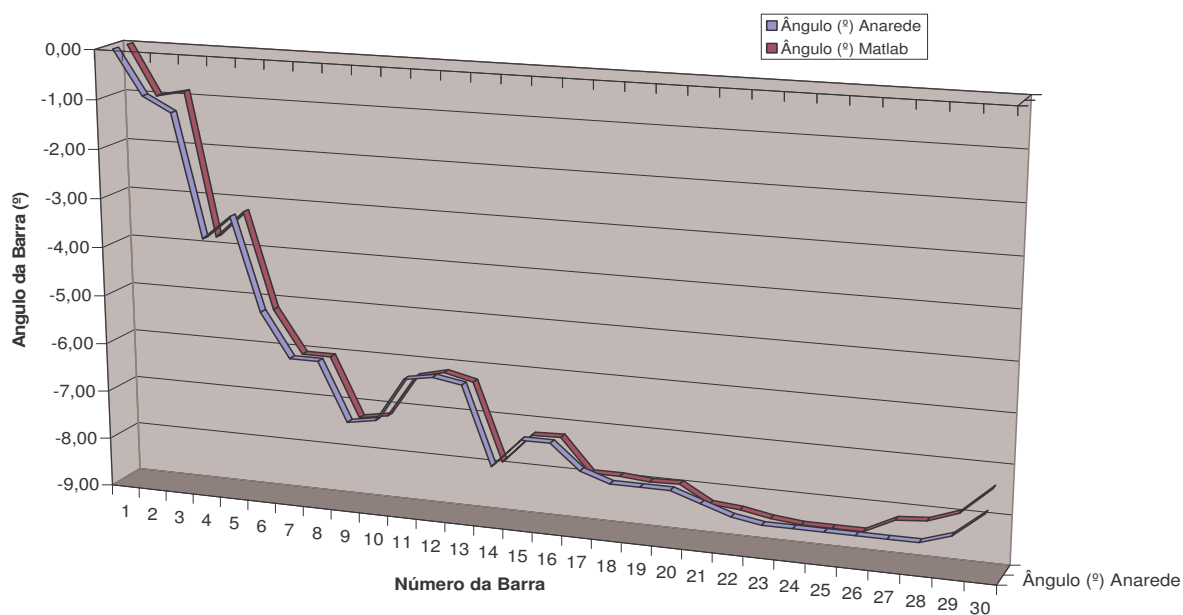


GRÁFICO 12 – ÂNGULOS NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL EM PARALELO - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
FONTE: O Autor

Para os valores dos ângulos das tensões também ocorreu a validação do caso devido a semelhança dos resultados dos dois programas computacionais.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi possível verificar pelos resultados apresentados que é perfeitamente possível com a metodologia proposta realizar o cálculo de fluxo de potência e obter-se o estado de cada barra de um sistema de distribuição do tipo radial, operando com ou sem geração distribuída, utilizando o método desacoplado rápido. Também foi possível observar que para um caso real os resultados também se apresentaram confiáveis e o método também possibilita rodar o fluxo de potência para o caso de alimentadores de distribuição operando com paralelismo temporário.

Quando se realizou a união de um sistema de transmissão com um sistema de distribuição foi possível verificar que a metodologia pode ser utilizada com os dois sistemas, com resultados satisfatórios, permitindo assim a utilização de um único método e uma única ferramenta computacional para simulação do fluxo de potência tanto na alta tensão como na média tensão.

6 CONCLUSÃO

Nessa dissertação propomos uma nova metodologia, onde podemos encontrar o estado das barras da rede de transmissão e da rede de distribuição através de uma única maneira.

A metodologia consiste na utilização do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com Rotação Ótima dos Eixos. Esse método pode ser adaptado na utilização de redes de distribuição apresentando resultados confiáveis.

O software comercial utilizado apresentou excelente desempenho quando solicitado para resolução do fluxo de potência, mesmo havendo mudanças dos parâmetros da rede.

A possibilidade de análise conjunta permite estudar os efeitos de eventos em uma ou ambas as redes e verificar quais seriam suas conseqüências no sistema como um todo. Citamos como exemplo duas importantes tarefas que podem ser feitas com a utilização do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com a Rotação Ótima dos Eixos na solução do fluxo de carga, que são a possibilidade de inclusão de geração distribuída ao longo da rede elétrica de distribuição e a realização de cálculo de fluxo de potência envolvendo paralelismo de alimentadores.

Os programas comerciais de cálculo de fluxo de potência na distribuição desenvolvidos anteriormente não permitem inclusão de geração distribuída no sistema elétrico de média tensão e nem a configuração de paralelismo entre alimentadores.

Os resultados indicam a possibilidade de aplicar o método proposto para permitir também a aplicação do método de Newton a sistemas de distribuição

Os programas comerciais atuais desenvolvidos para sistemas de transmissão podem ser facilmente adaptados pelos fornecedores para permitir seu uso para sistemas de distribuição, bastando apenas ajustar níveis de potência e tolerância.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se como trabalhos futuros:

- a. Desenvolver uma metodologia para análise do caso unificado, quando ocorre o caso da geração distribuída injetando potência no

sistema de transmissão.

- b. Introduzir análise de contingência das redes no caso unificado.
- c. Utilização desta metodologia para todo o sistema de distribuição, inclusive baixa tensão.
- d. Utilização desta metodologia para estudos de planejamento de sistemas de distribuição de media ou baixa tensão interligados em anel.
- e. Modelagem de transformador de fronteira para compensar a rotação da totalidade dos alimentadores de distribuição de uma subestação.
- f. Utilização da rotação dos eixos ou normalização complexa com a utilização do método de Newton-Raphson, para redes de distribuição e caso unificado.

REFERÊNCIAS

- [1] BARBOSA, A. de S. et al. Aspectos Práticos Sobre a Utilização de Programas Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição com Configuração Radial. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 9., 1992, Blumenau, 1992 .
- [2] BAUAB, G. H. S. **Cálculo de Fluxo de Carga em Sistemas de Transmissão com Alimentadores Primários de Distribuição**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [3] BRASZ, H. D. M.; et al. **Método da Soma de Potências com Ajuste de Demanda Considerando Múltiplas Medições** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE -2010. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/III%20SBSE%20-%202010/PDF/SBSE2010-0217.PDF> Acesso em: 10/10/2010.
- [4] GARCIA, A. V. et al. Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 9., 1984, Salvador. **Anais...** Salvador: Coelba, s.d. v.92, 18p.
- [5] GOMES, R. B.. **Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos**. 2006. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [6] HAQUE, M. H. Load Flow Solution of Distribution Systems with Voltage Dependent Load Models. **Electric Power Systems Research**, v. 36, p. 151-156, 1996.
- [7] LOURENÇO, E. M.; Silva, N. S.; Simões Costa, A S. **Fast Decoupled Steady-State Solution for Power Networks Modeled at the Bus Section Level**. Bucareste: IEEE Power Tech, 2009.
- [8] LOURENÇO, E. M ; TORTELLI, O. L.; LODDI, T. Unified Load Flow Analysis for Emerging Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems: Innovative Smart Grid Technologies**. Gothenburg, Suécia, 2010.
- [9] MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo:

Edgard Blücher: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 1983.

[10] GARCIA, A. Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 4, p.1561-1570,1991.

[11]GARCIA, A.; SAAVEDRA, O.R. Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1425-1431, 1990.

[12]PANTUZI. A. V. **Desempenho de um Algoritmo Backward-Forward Sweep de Cálculo de Fluxo de Potência**. 2006. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Paulista – Julio Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

[13] SHIRMOHAMMAD, D.; HONG, H. W.; SEMLEY, A. S.; LUO, G. X. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753-762,1988.

[14] STEVENSON JR, W. D.. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

[15] STOTT, B.; Alsac, A. Fast Decoupled Load Flow. **IEEE Transmissions and Power Systems**. v. PAS-86, n. 11, pp 1449-1460, 1967.

[16] VAN AMERONGEN, R. A. M.. A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Loadflow. **IEEE Transmissions and Power Systems**, v. 4, n. 2, p. 760-770, 1989.

[17] ZHANG, F. ; CHENG, C. S. A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n.1, Feb., 1997.

[18] BARBOSA A.S.**Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição, Aplicações Práticas**, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba , João Pessoa , 1995

[19] SOUZA A.R.R. **Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial**, 2006 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade São Paulo campus de São Carlos, São Carlos, 2006

ANEXO 1 - DADOS E RESULTADOS

1. Sistemas Bases

1.1 - Caso de 34 Barras

TABELA 1– VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X

DE / PARA	r em pu	x em pu	Relação r/x
1 para 2	0,0967	0,0397	2,4375
2 para 3	0,0886	0,0364	2,4375
3 para 4	0,1359	0,0377	3,6024
4 para 5	0,1236	0,0343	3,6024
5 para 6	0,1236	0,0343	3,6024
6 para 7	0,2598	0,0446	5,8222
7 para 8	0,1732	0,0298	5,8222
8 para 9	0,2598	0,0446	5,8222
9 para 10	0,1732	0,0298	5,8222
10 para 11	0,1083	0,0186	5,8222
11 para 12	0,0866	0,0149	5,8222
3 para 13	0,1299	0,0223	5,8222
13 para 14	0,1732	0,0298	5,8222
14 para 15	0,0866	0,0149	5,8222
15 para 16	0,0433	0,0074	5,8222
6 para 17	0,1483	0,0412	3,6024
17 para 18	0,1359	0,0377	3,6024
18 para 19	0,1718	0,0391	4,3953
19 para 20	0,1562	0,0355	4,3953
20 para 21	0,1562	0,0355	4,3953
21 para 22	0,2165	0,0372	5,8222
22 para 23	0,2165	0,0372	5,8222
23 para 24	0,2598	0,0446	5,8222
24 para 25	0,1732	0,0298	5,8222
25 para 26	0,1083	0,0186	5,8222
26 para 27	0,0866	0,0149	5,8222
7 para 28	0,1299	0,0223	5,8222
28 para 29	0,1299	0,0223	5,8222
29 para 30	0,1299	0,0223	5,8222
10 para 31	0,1299	0,0223	5,8222
31 para 32	0,1732	0,0298	5,8222
32 para 33	0,1299	0,0223	5,8222
33 para 34	0,0866	0,0149	5,8222

FONTE: O Autor

TABELA 2 – POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DE CADA BARRA

Barra	P (kW)	Q (kVAr)
2	230	142,5
4	230	142,5
5	230	142,5
8	230	142,5
9	230	142,5
11	230	142,5
12	137	84
13	72	45
14	72	45
15	72	45
16	13,5	7,5
17	230	142,5
18	230	142,5
19	230	142,5
20	230	142,5
21	230	142,5
22	230	142,5
23	230	142,5
24	230	142,5
25	230	142,5
26	230	142,5
27	137	85
28	75	48
29	75	48
30	75	48
31	57	37,5
32	57	37,5
33	57	37,5
34	57	37,5

FONTE: O Autor

TABELA 3 -: REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 34 BARRAS: VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X

DE / PARA	r (rotacionado) em pu	x (rotacionado) em pu	Relação r rot/x rot
1 para 2	-0,0193	0,1027	-0,1880
2 para 3	-0,0177	0,0942	-0,1880
3 para 4	-0,0095	0,1407	-0,0674
4 para 5	-0,0086	0,1279	-0,0674
5 para 6	-0,0086	0,1279	-0,0674
6 para 7	0,0088	0,2635	0,0334
7 para 8	0,0059	0,1757	0,0334
8 para 9	0,0088	0,2635	0,0334
9 para 10	0,0059	0,1757	0,0334
10 para 11	0,0037	0,1098	0,0334
11 para 12	0,0029	0,0878	0,0334
3 para 13	0,0044	0,1317	0,0334
13 para 14	0,0059	0,1757	0,0334
14 para 15	0,0029	0,0878	0,0334
15 para 16	0,0015	0,0439	0,0334
6 para 17	-0,0103	0,1535	-0,0674
17 para 18	-0,0095	0,1407	-0,0674
18 para 19	-0,0036	0,1762	-0,0202
19 para 20	-0,0032	0,1602	-0,0202
20 para 21	-0,0032	0,1602	-0,0202
21 para 22	0,0073	0,2196	0,0334
22 para 23	0,0073	0,2196	0,0334
23 para 24	0,0088	0,2635	0,0334
24 para 25	0,0059	0,1757	0,0334
25 para 26	0,0037	0,1098	0,0334
26 para 27	0,0029	0,0878	0,0334
7 para 28	0,0044	0,1317	0,0334
28 para 29	0,0044	0,1317	0,0334
29 para 30	0,0044	0,1317	0,0334
10 para 31	0,0044	0,1317	0,0334
31 para 32	0,0059	0,1757	0,0334
32 para 33	0,0044	0,1317	0,0334
33 para 34	0,0029	0,0878	0,0334

FONTE: O Autor

TABELA 4 -: REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 34 BARRAS: VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS

Barra	P rotacionado (kW)	Q rotacionado (kVAr)
2	-93,0744	254,0539
4	-93,0744	254,0539
5	-93,0744	254,0539
8	-93,0744	254,0539
9	-93,0744	254,0539
11	-93,0744	254,0539
12	-54,5777	151,1498
13	-29,5196	79,60902
14	-29,5196	79,60902
15	-29,5196	79,60902
16	-4,61676	14,73721
17	-93,0744	254,0539
18	-93,0744	254,0539
19	-93,0744	254,0539
20	-93,0744	254,0539
21	-93,0744	254,0539
22	-93,0744	254,0539
23	-93,0744	254,0539
24	-93,0744	254,0539
25	-93,0744	254,0539
26	-93,0744	254,0539
27	-55,5571	151,352
28	-31,8513	83,15343
29	-31,8513	83,15343
30	-31,8513	83,15343
31	-25,206	63,40276
32	-25,206	63,40276
33	-25,206	63,40276
34	-25,206	63,40276

FONTE: O AUTOR

TABELA 5 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PELO ANAREDE

Barra	Anarede		Erro	
	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
1	1,0000	0,00	0,00%	0,00%
2	0,9940	-0,10	0,01%	-106,00%
3	0,9890	-0,20	0,00%	-100,00%
4	0,9820	-0,40	0,00%	-81,82%
5	0,9750	-0,50	0,11%	-56,25%
6	0,9700	-0,70	0,04%	-70,73%
7	0,9660	-0,80	0,06%	-60,00%
8	0,9640	-0,80	0,05%	-42,86%
9	0,9610	-0,90	0,10%	-45,16%
10	0,9600	-0,90	0,08%	-38,46%
11	0,9600	-1,00	0,03%	-51,52%
12	0,9590	-1,00	0,12%	-51,52%
13	0,9880	-0,20	0,07%	-81,82%
14	0,9880	-0,20	0,04%	-66,67%
15	0,9880	-0,20	0,03%	-66,67%
16	0,9880	-0,20	0,03%	-66,67%
17	0,9650	-0,90	0,10%	-83,67%
18	0,9610	-1,00	0,13%	-81,82%
19	0,9570	-1,20	0,12%	-90,48%
20	0,9540	-1,30	0,09%	-85,71%
21	0,9510	-1,50	0,10%	-97,37%
22	0,9480	-1,70	0,07%	-102,38%
23	0,9450	-1,80	0,11%	-100,00%
24	0,9420	-1,90	0,16%	-97,92%
25	0,9410	-1,90	0,13%	-91,92%
26	0,9410	-1,90	0,08%	-88,12%
27	0,9410	-2,00	0,07%	-98,02%
28	0,9650	-0,80	0,13%	-56,86%
29	0,9650	-0,80	0,10%	-53,85%
30	0,9650	-0,80	0,09%	-53,85%
31	0,9600	-0,90	0,05%	-38,46%
32	0,9590	-1,00	0,11%	-51,52%
33	0,9590	-1,00	0,10%	-49,25%
34	0,9590	-1,00	0,09%	-49,25%

FONTE: O AUTOR

TABELA 6: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PELO MATLAB – CASO DE 34 BARRAS

Barra	MATLAB		Erro	
	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
1	1,0000	0,00	0,00%	0,00%
2	0,9943	-0,05	-0,02%	0,00%
3	0,9893	-0,10	-0,03%	0,00%
4	0,9825	-0,21	-0,05%	4,55%
5	0,9767	-0,31	-0,07%	3,13%
6	0,9712	-0,41	-0,08%	0,00%
7	0,9676	-0,50	-0,11%	0,00%
8	0,9656	-0,55	-0,12%	1,79%
9	0,9632	-0,61	-0,13%	1,61%
10	0,9621	-0,64	-0,14%	1,54%
11	0,9616	-0,65	-0,13%	1,52%
12	0,9615	-0,65	-0,14%	1,52%
13	0,9890	-0,11	-0,03%	0,00%
14	0,9887	-0,11	-0,03%	8,33%
15	0,9886	-0,12	-0,03%	0,00%
16	0,9886	-0,12	-0,03%	0,00%
17	0,9668	-0,48	-0,09%	2,04%
18	0,9632	-0,54	-0,10%	1,82%
19	0,9592	-0,62	-0,11%	1,59%
20	0,9559	-0,68	-0,11%	2,86%
21	0,9531	-0,74	-0,12%	2,63%
22	0,9499	-0,82	-0,13%	2,38%
23	0,9473	-0,88	-0,14%	2,22%
24	0,9448	-0,94	-0,14%	2,08%
25	0,9436	-0,97	-0,14%	2,02%
26	0,9431	-0,98	-0,14%	2,97%
27	0,9430	-0,99	-0,14%	1,98%
28	0,9673	-0,51	-0,11%	0,00%
29	0,9671	-0,51	-0,11%	1,92%
30	0,9670	-0,51	-0,12%	1,92%
31	0,9617	-0,65	-0,13%	0,00%
32	0,9614	-0,66	-0,14%	0,00%
33	0,9613	-0,67	-0,14%	0,00%
34	0,9612	-0,67	-0,14%	0,00%

FONTE: O Autor

1.2 - Caso de 70 Barras

TABELA 7 – VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X

DE / PARA	r em pu	x em pu	Relação r/x
1 para 2	0,0003	0,0007	0,4167
2 para 3	0,0003	0,0007	0,4167
3 para 4	0,0001	0,0001	1,0000
4 para 5	0,0009	0,0022	0,4167
5 para 6	0,0157	0,0183	0,8537
6 para 7	0,2284	0,1163	1,9635
7 para 8	0,2378	0,1211	1,9634
8 para 9	0,0575	0,0293	1,9617
9 para 10	0,0308	0,0157	1,9641
10 para 11	0,5110	0,1689	3,0255
11 para 12	0,1168	0,0386	3,0242
12 para 13	0,4439	0,1467	3,0259
13 para 14	0,6426	0,2121	3,0294
14 para 15	0,6514	0,2153	3,0261
15 para 16	0,6601	0,2181	3,0263
16 para 17	0,1227	0,4056	0,3025
17 para 18	0,2336	0,0772	3,0242
18 para 19	0,0029	0,0010	2,9375
19 para 20	0,2044	0,0676	3,0249
20 para 21	0,1314	0,0434	3,0259
21 para 22	0,2131	0,0704	3,0257
22 para 23	0,0087	0,0029	3,0435
23 para 24	0,0993	0,0328	3,0247
24 para 25	0,2161	0,0714	3,0245
25 para 26	0,4672	0,1544	3,0255
26 para 27	0,1927	0,0637	3,0255
27 para 28	0,1081	0,0357	3,0280
3 para 29	0,0027	0,0067	0,4074
29 para 30	0,0399	0,0976	0,4089
30 para 31	0,2482	0,0820	3,0251
31 para 32	0,0438	0,0145	3,0259
32 para 33	0,2190	0,0724	3,0259
33 para 34	0,5235	0,1757	2,9794
34 para 35	1,0657	0,3523	3,0252
35 para 36	0,9197	0,3040	3,0248
4 para 37	0,0027	0,0674	0,0407

37 para 38	0,0399	0,0976	0,4089
38 para 39	0,0657	0,0767	0,8561
39 para 40	0,0190	0,0190	0,9967
40 para 41	0,0011	0,0013	0,8571
41 para 42	0,4544	0,5309	0,8559
42 para 43	0,1934	0,2260	0,8556
43 para 44	0,0256	0,0298	0,8577
44 para 45	0,0057	0,0072	0,7931
45 para 46	0,0679	0,0857	0,7932
46 para 47	0,0006	0,0007	0,7500
5 para 48	0,0021	0,0052	0,4048
48 para 49	0,0531	0,1300	0,4085
49 para 50	0,1808	0,4424	0,4087
50 para 51	0,0513	0,1255	0,4088
9 para 52	0,0579	0,0295	1,9619
52 para 53	0,2071	0,0695	2,9794
10 para 54	0,1086	0,0553	1,9639
54 para 55	0,1267	0,0645	1,9632
55 para 56	0,1773	0,0903	1,9641
56 para 57	0,1755	0,0894	1,9630
57 para 58	0,9920	0,3330	2,9792
58 para 59	0,4890	0,1641	2,9798
59 para 60	0,1898	0,0665	2,8537
60 para 61	0,2409	0,0731	3,2944
61 para 62	0,3166	0,1613	1,9632
62 para 63	0,0608	0,0309	1,9637
63 para 64	0,0905	0,0460	1,9648
64 para 65	0,4433	0,2258	1,9632
65 para 66	0,6495	0,3308	1,9634
12 para 67	0,1255	0,0381	3,2930
67 para 68	0,0029	0,0009	3,3571
13 para 69	0,4613	0,1525	3,0254
69 para 70	0,0029	0,0010	2,9375

FONTE: O Autor

TABELA 8 – VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS

Barra	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	2,6	2,2
8	40,4	30
9	75	54
10	30	22
11	28	19
12	145	104
13	145	104
14	8	5,5
15	8	5,5
16	0	0
17	45,5	30
18	60	35
19	60	35
20	0	0
21	1	0,6
22	114	81
23	5,3	3,5
24	0	0
25	28	20
26	0	0
27	14	10
28	14	10
29	26	18,6
30	26	18,6
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	14	10
35	19,5	14
36	6	4

37	26	18,55
38	26	18,55
39	0	0
40	24	17
41	24	17
42	1,2	1
43	0	0
44	6	4,3
45	0	0
46	39,22	26,3
47	39,22	26,3
48	0	0
49	79	56,4
50	384,7	274,5
51	384,7	274,5
52	40,5	28,3
53	3,6	2,7
54	4,35	3,5
55	26,4	19
56	24	17,2
57	0	0
58	0	0
59	0	0
60	100	72
61	0	0
62	1244	888
63	32	23
64	0	0
65	227	162
66	59	42
67	18	13
68	18	13
69	28	20
70	28	20

FONTE: O Autor

TABELA 9 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 70 BARRAS: VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS E RELAÇÃO R/X

DE / PARA	r rot	x rot	Relação r rot /x rot
1 para 2	-0,0004	0,0007	-0,6602
2 para 3	-0,0004	0,0007	-0,6602
3 para 4	0,0000	0,0001	-0,1954
4 para 5	-0,0013	0,0020	-0,6602
5 para 6	-0,0065	0,0232	-0,2786
6 para 7	0,0310	0,2544	0,1220
7 para 8	0,0323	0,2649	0,1220
8 para 9	0,0078	0,0641	0,1216
9 para 10	0,0042	0,0343	0,1221
10 para 11	0,1452	0,5182	0,2802
11 para 12	0,0332	0,1185	0,2801
12 para 13	0,1262	0,4501	0,2803
13 para 14	0,1829	0,6516	0,2807
14 para 15	0,1852	0,6606	0,2803
15 para 16	0,1877	0,6694	0,2803
16 para 17	-0,2679	0,3282	-0,8163
17 para 18	0,0664	0,2369	0,2801
18 para 19	0,0008	0,0030	0,2707
19 para 20	0,0581	0,2073	0,2802
20 para 21	0,0373	0,1333	0,2803
21 para 22	0,0606	0,2161	0,2803
22 para 23	0,0025	0,0088	0,2821
23 para 24	0,0282	0,1007	0,2802
24 para 25	0,0614	0,2191	0,2801
25 para 26	0,1328	0,4738	0,2802
26 para 27	0,0548	0,1955	0,2802
27 para 28	0,0307	0,1096	0,2805
3 para 29	-0,0041	0,0060	-0,6717
29 para 30	-0,0587	0,0877	-0,6698
30 para 31	0,0705	0,2517	0,2802
31 para 32	0,0124	0,0444	0,2803
32 para 33	0,0622	0,2221	0,2803
33 para 34	0,1466	0,5324	0,2753

34 para 35	0,3028	1,0808	0,2802
35 para 36	0,2613	0,9327	0,2802
4 para 37	-0,0544	0,0399	-1,3624
37 para 38	-0,0587	0,0877	-0,6698
38 para 39	-0,0270	0,0974	-0,2771
39 para 40	-0,0052	0,0264	-0,1971
40 para 41	-0,0005	0,0017	-0,2764
41 para 42	-0,1867	0,6734	-0,2772
42 para 43	-0,0795	0,2867	-0,2774
43 para 44	-0,0105	0,0379	-0,2761
44 para 45	-0,0028	0,0088	-0,3179
45 para 46	-0,0331	0,1042	-0,3179
46 para 47	-0,0003	0,0009	-0,3479
5 para 48	-0,0032	0,0047	-0,6750
48 para 49	-0,0782	0,1166	-0,6703
49 para 50	-0,2661	0,3970	-0,6701
50 para 51	-0,0754	0,1126	-0,6700
9 para 52	0,0078	0,0645	0,1217
52 para 53	0,0580	0,2106	0,2753
10 para 54	0,0148	0,1209	0,1221
54 para 55	0,0172	0,1411	0,1220
55 para 56	0,0241	0,1975	0,1221
56 para 57	0,0238	0,1955	0,1219
57 para 58	0,2777	1,0089	0,2753
58 para 59	0,1369	0,4973	0,2753
59 para 60	0,0508	0,1946	0,2611
60 para 61	0,0739	0,2407	0,3069
61 para 62	0,0430	0,3527	0,1220
62 para 63	0,0083	0,0677	0,1220
63 para 64	0,0123	0,1008	0,1223
64 para 65	0,0602	0,4938	0,1220
65 para 66	0,0883	0,7235	0,1220
12 para 67	0,0385	0,1254	0,3067
67 para 68	0,0009	0,0029	0,3126
13 para 69	0,1311	0,4679	0,2802
69 para 70	0,0008	0,0030	0,2707

FONTE: O AUTOR

TABELA 10 - REDE FICTÍCIA DO SISTEMA DE 70 BARRAS: VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS

Barra	Prot (kW)	Qrot (KVAr)
1	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000
7	-0,3732	3,3854
8	-2,3277	50,2667
9	-2,9167	92,3715
10	-1,4985	37,1720
11	-0,1266	33,8376
12	-5,3070	178,3615
13	-5,3070	178,3615
14	-0,0954	9,7078
15	-0,0954	9,7078
16	0,0000	0,0000
17	0,5202	54,4975
18	4,4692	69,3183
19	4,4692	69,3183
20	0,0000	0,0000
21	0,0607	1,1646
22	-3,5374	139,8016
23	0,0560	6,3511
24	0,0000	0,0000
25	-0,9562	34,3960
26	0,0000	0,0000
27	-0,4781	17,1980
28	-0,4781	17,1980
29	-0,9116	31,9551
30	-0,9116	31,9551
31	0,0000	0,0000
32	0,0000	0,0000
33	0,0000	0,0000
34	-0,4781	17,1980
35	-0,7251	23,9943

36	0,0321	7,2110
37	-0,8701	31,9272
38	-0,8701	31,9272
39	0,0000	0,0000
40	-0,7011	29,4025
41	-0,7011	29,4025
42	-0,1595	1,5539
43	0,0000	0,0000
44	-0,2167	7,3786
45	0,0000	0,0000
46	0,0828	47,2217
47	0,0828	47,2217
48	0,0000	0,0000
49	-2,6740	97,0299
50	-12,8999	472,4171
51	-12,8999	472,4171
52	-0,8616	49,4004
53	-0,2296	4,4941
54	-0,4744	5,5630
55	-1,0200	32,5103
56	-0,8670	29,5142
57	0,0000	0,0000
58	0,0000	0,0000
59	0,0000	0,0000
60	-3,8889	123,1620
61	0,0000	0,0000
62	-42,0066	1527,8467
63	-1,2113	39,3895
64	0,0000	0,0000
65	-7,6332	278,7736
66	-1,8962	72,3975
67	-0,7332	22,1915
68	-0,7332	22,1915
69	-0,9562	34,3960
70	-0,9562	34,3960

FONTE: O Autor

TABELA 11 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PELO ANAREDE – CASO DE 70 BARRAS

			Anarede		Erro %	
Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
1	1,000	0,000	1,000	0,000	0,00%	0
2	1,000	0,000	1,000	0,000	0,00%	0
3	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,01%	0
4	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,01%	0
5	1,000	-0,010	1,000	0,000	-0,02%	100,00%
6	0,999	-0,020	0,999	-0,020	0,00%	0,00%
7	0,990	0,050	0,990	0,049	0,01%	2,00%
8	0,981	0,120	0,981	0,121	-0,02%	-0,83%
9	0,979	0,140	0,979	0,138	-0,04%	1,43%
10	0,977	0,150	0,977	0,147	0,05%	2,00%
11	0,972	0,230	0,972	0,232	0,05%	-0,87%
12	0,971	0,250	0,971	0,251	0,03%	-0,40%
13	0,968	0,300	0,968	0,304	0,02%	-1,33%
14	0,965	0,350	0,965	0,351	0,03%	-0,29%
15	0,962	0,400	0,962	0,397	0,04%	0,75%
16	0,959	0,440	0,959	0,444	0,05%	-0,91%
17	0,959	0,450	0,958	0,374	0,10%	16,89%
18	0,958	0,460	0,957	0,388	0,11%	15,65%
19	0,958	0,470	0,957	0,388	0,11%	17,45%
20	0,958	0,470	0,957	0,397	0,06%	15,53%
21	0,957	0,480	0,956	0,403	0,13%	16,04%
22	0,957	0,490	0,956	0,411	0,08%	16,12%
23	0,957	0,490	0,956	0,412	0,08%	15,92%
24	0,957	0,490	0,956	0,413	0,08%	15,71%
25	0,957	0,490	0,956	0,416	0,06%	15,10%
26	0,956	0,500	0,955	0,419	0,15%	16,20%
27	0,956	0,500	0,955	0,420	0,14%	16,00%
28	0,956	0,500	0,955	0,421	0,14%	15,80%
29	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,01%	0
30	1,000	-0,010	1,000	0,000	-0,01%	100,00%
31	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,03%	0
32	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,04%	0
33	0,999	0,000	1,000	0,000	-0,06%	0
34	0,999	0,000	0,999	0,003	0,00%	0
35	0,999	0,010	0,999	0,009	0,00%	10,00%

36	0,999	0,010	0,999	0,010	-0,01%	0,00%
37	1,000	0,000	1,000	0,000	-0,01%	0
38	1,000	-0,010	1,000	-0,020	-0,03%	-100,00%
39	1,000	-0,010	0,999	-0,020	0,06%	-100,00%
40	1,000	-0,010	0,999	-0,020	0,05%	-100,00%
41	1,000	-0,010	0,999	-0,020	0,05%	-100,00%
42	0,999	-0,020	0,999	-0,030	-0,02%	-50,00%
43	0,999	-0,030	0,998	-0,030	0,05%	0,00%
44	0,999	-0,030	0,998	-0,040	0,05%	-33,33%
45	0,998	-0,030	0,998	-0,040	0,05%	-33,33%
46	0,998	-0,030	0,998	-0,040	0,04%	-33,33%
47	0,998	-0,030	0,998	-0,040	0,04%	-33,33%
48	1,000	-0,010	1,000	0,000	-0,02%	100,00%
49	0,999	-0,050	0,998	-0,050	0,05%	0,00%
50	0,995	-0,190	0,995	-0,190	-0,03%	0,00%
51	0,995	-0,230	0,994	-0,210	0,10%	8,70%
52	0,979	0,140	0,978	0,139	0,06%	0,71%
53	0,979	0,140	0,978	0,139	0,05%	0,71%
54	0,975	0,170	0,975	0,169	-0,04%	0,59%
55	0,971	0,190	0,971	0,195	0,04%	-2,63%
56	0,967	0,230	0,967	0,230	-0,01%	0,00%
57	0,963	0,270	0,962	0,265	0,06%	1,85%
58	0,940	0,660	0,940	0,662	0,01%	-0,30%
59	0,929	0,860	0,929	0,865	0,00%	-0,58%
60	0,925	0,950	0,925	0,941	-0,03%	0,95%
61	0,920	1,050	0,920	1,050	-0,03%	0,00%
62	0,912	1,120	0,912	1,120	0,04%	0,00%
63	0,912	1,120	0,912	1,120	0,01%	0,00%
64	0,912	1,140	0,912	1,120	-0,04%	1,75%
65	0,910	1,140	0,910	1,140	-0,03%	0,00%
66	0,909	1,150	0,909	1,140	0,02%	0,87%
67	0,971	0,250	0,971	0,252	0,03%	-0,80%
68	0,971	0,250	0,971	0,252	0,03%	-0,80%
69	0,968	0,310	0,968	0,310	-0,02%	0,00%
70	0,968	0,310	0,968	0,310	-0,02%	0,00%

FONTE: O AUTOR

2 - Caso Unificado

TABELA 12– TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Barra	Tensão (pu) e Ângulo (°)		Tensão (pu) e Ângulo (°)	
	Anarede		Matlab	
1	1,060	0,0	1,060	0,00
2	1,040	-0,9	1,045	-0,87
3	1,010	-1,2	1,010	-0,65
4	1,031	-3,7	1,034	-3,53
5	1,037	-3,1	1,042	-2,98
6	1,070	-5,1	1,070	-4,60
7	1,045	-6,0	1,052	-5,53
8	1,090	-6,0	1,090	-5,53
9	1,025	-7,2	1,039	-6,58
10	1,025	-7,1	1,037	-6,52
11	1,043	-6,2	1,050	-5,68
12	1,053	-6,1	1,054	-5,55
13	1,045	-6,2	1,048	-5,71
14	1,016	-7,8	1,024	-7,21

FONTE: O AUTOR

TABELA 13 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO DE 10 BARRAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Barra	Tensão (pu) e Ângulo (°)		Tensão (pu) e Ângulo (°)	
	Anarede		Matlab	
1	1,060	0,0	1,060	0,00
2	1,040	-0,8	1,045	-1,00
3	1,010	-1,0	1,010	-0,88
4	1,032	-3,4	1,031	-3,79
5	1,040	-2,9	1,039	-3,23
6	1,070	-4,7	1,070	-5,19
7	1,042	-5,3	1,044	-6,06
8	1,090	-5,3	1,090	-6,06
9	1,018	-6,4	1,024	-7,27
10	1,020	-6,4	1,024	-7,17
11	1,040	-5,6	1,043	-6,30
12	1,053	-5,6	1,053	-6,16
13	1,045	-5,7	1,045	-6,30
14	1,018	-6,4	1,015	-7,88
15	1,018	-6,4	1,018	-7,43
16	1,018	-6,4	1,018	-7,50
17	1,011	-6,9	1,010	-7,80
18	1,006	-7,6	1,005	-8,68
19	0,983	-8,6	0,981	-9,64
20	0,968	-9,0	0,966	-9,91
21	0,937	-10,0	0,936	-10,94
22	0,928	-10,4	0,926	-11,33
23	0,910	-10,8	0,908	-11,8
24	0,881	-11,6	0,879	-12,6
25	0,860	-12,1	0,858	-12,12

FONTE: O AUTOR

TABELA 14 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO DE 10 BARRAS COM GD - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Barra	Tensão (pu) e Ângulo (°)		Tensão (pu) e Ângulo (°)	
	Anarede		Matlab	
1	1,060	0,0	1,060	0,00
2	1,040	-0,8	1,045	-0,97
3	1,010	-0,9	1,010	-0,82
4	1,033	-3,3	1,031	-3,72
5	1,040	-2,8	1,040	-3,17
6	1,070	-4,5	1,070	-5,05
7	1,042	-5,3	1,046	-5,92
8	1,090	-5,2	1,090	-5,92
9	1,018	-6,4	1,027	-7,08
10	1,022	-6,2	1,027	-7,00
11	1,042	-5,5	1,044	-6,14
12	1,053	-5,5	1,053	-6,01
13	1,045	-5,6	1,046	-6,16
14	1,013	-7,0	1,017	-7,71
15	1,018	-6,4	1,021	-7,20
16	1,021	-6,2	1,028	-7,25
17	1,015	-6,6	1,015	-7,62
18	1,010	-7,2	1,010	-8,18
19	0,991	-7,9	0,990	-8,84
20	0,979	-8,1	0,979	-8,96
21	0,959	-8,6	0,959	-9,54
22	0,954	-8,8	0,953	-9,89
23	0,945	-9,0	0,945	-9,87
24	0,938	-9,0	0,937	-9,89
25	0,948	-8,7	0,940	-9,62

FONTE: O AUTOR

TABELA 15– TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Barra	Tensão (pu) e Ângulo (°)		Tensão (pu) e Ângulo (°)	
	Anarede		Matlab	
1	1,060	0,0	1,060	0,00
2	1,040	-0,9	1,041	-1,00
3	1,010	-1,2	1,010	-0,88
4	1,033	-3,7	1,031	-3,79
5	1,040	-3,2	1,040	-3,23
6	1,070	-5,1	1,070	-5,19
7	1,046	-6,0	1,045	-6,06
8	1,090	-6,0	1,090	-6,06
9	1,026	-7,2	1,025	-7,27
10	1,026	-7,1	1,025	-7,17
11	1,043	-6,2	1,043	-6,30
12	1,053	-6,1	1,053	-6,16
13	1,046	-6,2	1,045	-6,30
14	1,016	-7,8	1,016	-7,88
15	1,026	-7,2	1,025	-7,27
16	1,026	-7,2	1,028	-7,25
17	1,005	-7,7	1,003	-7,77
18	0,996	-7,9	0,994	-7,97
19	0,994	-7,9	0,992	-8,02
20	0,992	-7,9	0,990	-8,01
21	0,986	-8,1	0,985	-8,21
22	0,979	-8,3	0,978	-8,37
23	0,976	-8,4	0,974	-8,45
24	0,976	-8,4	0,976	-8,51
25	0,971,	-8,5	0,976	-8,21
26	0,971	-8,5	0,971	-8,16
27	0,979	-8,3	0,979	-7,94
28	1,020	-7,7	1,020	-7,39

FONTE: O AUTOR

TABELA 16 – TENSÕES NAS BARRAS DO CASO 14 BARRAS MAIS CASO REAL EM PARALELO - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Barra	Tensão (pu) e Ângulo (°)		Tensão (pu) e Ângulo (°)	
	Anarede		Matlab	
1	1,060	0,0	1,060	0,00
2	1,040	-0,9	1,041	-1,00
3	1,010	-1,2	1,010	-0,88
4	1,033	-3,7	1,031	-3,79
5	1,040	-3,2	1,040	-3,23
6	1,070	-5,1	1,070	-5,19
7	1,046	-6,0	1,045	-6,06
8	1,090	-6,0	1,090	-6,06
9	1,026	-7,2	1,025	-7,27
10	1,026	-7,1	1,025	-7,17
11	1,043	-6,2	1,043	-6,30
12	1,053	-6,1	1,053	-6,16
13	1,046	-6,2	1,045	-6,30
14	1,016	-7,8	1,016	-7,88
15	1,026	-7,2	1,025	-7,27
16	1,026	-7,2	1,028	-7,25
17	1,004	-7,7	1,001	-7,92
18	0,995	-7,9	1,000	-7,92
19	0,993	-7,9	0,999	-7,97
20	0,991	-7,9	0,995	-7,95
21	0,986	-8,1	0,985	-8,29
22	0,979	-8,3	0,983	-8,34
23	0,976	-8,4	0,979	-8,45
24	0,976	-8,4	0,973	-8,51
25	0,974	-8,4	0,973	-8,51
26	0,974	-8,4	0,973	-8,51
27	0,974	-8,4	0,976	-8,21
28	0,974	-8,4	0,971	-8,16
29	0,981	-8,2	0,979	-7,94
30	1,004	-7,7	1,002	-7,39

FONTE: O AUTOR

ANEXO 2 – SISTEMA DE 14 BARRAS EM ANEL

TABELA 1 -: SISTEMA DE 14 BARRAS: VALORES DAS RESISTÊNCIAS, REATÂNCIAS SERIE E SHUNT

DE / PARA	R	X	bsh
1 para 2	0,0194	0,0559	0,0528
1 para 5	0,0540	0,2230	0,0492
2 para 3	0,0470	0,1980	0,0438
2 para 4	0,0581	0,1763	0,0340
2 para 5	0,0570	0,1739	0,0346
3 para 4	0,0670	0,1710	0,0128
4 para 5	0,0134	0,0421	
4 para 7	0,0000	0,2091	
4 para 9	0,0000	0,5556	
5 para 6	0,0000	0,2520	
6 para 11	0,0950	0,1989	
6 para 12	0,1229	0,2558	
6 para 13	0,0662	0,1303	
7 para 8	0,0000	0,1762	
7 para 9	0,0000	0,1100	
9 para 10	0,0318	0,0845	
9 para 14	0,1271	0,2704	
10 para 11	0,0821	0,1921	
12 para 13	0,2209	0,1999	
13 para 14	0,1709	0,3480	

FONTE: O AUTOR

TABELA 2 -: SISTEMA DE 14 BARRAS: VALORES DAS POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DAS BARRAS

Potências	Tipo	Pd	Qd	Pg	Qg
Barra1	Ref				
Barra2	PV	21,7		40	
Barra3	PV			20	
Barra4	PQ	47,8	-3,9		
Barra5	PQ	7,6	1,6		
Barra6	PV			30	
Barra7	PQ				
Barra8	PV				
Barra9	PQ	29,5	16,6		
Barra10	PQ	9	5,8		
Barra11	PQ	3,5	1,8		
Barra12	PQ	6,1	1,6		
Barra13	PQ	13,5	5,8		
Barra14	PQ	14,9	5		

FONTE: O AUTOR